

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Michaela Vohánková

Historické použití odpadu jáchymovské uranové továrny jako stavebního materiálu

Historical use of waste from the Jáchymov uranium factory as a building material

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Viktor Goliáš, Ph.D.

Praha, 2023

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se svým školitelem. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 11. 5. 2023

Podpis.....

### **Poděkování:**

Poděkování patří mému školiteli Mgr. Viktorovi Goliášovi, Ph.D. za cenné rady a odborný dozor při psaní této práce. Dále děkuji doc. RNDr. Jiřímu Bruthansovi, Ph.D. za poskytnutí teoretických i praktických rad a zapůjčení vrtačky s diamantovou jádrovou vrtnou korunkou, Mgr. Martinovi Rackovi, Ph.D. za vyhodnocení dat na elektronovém mikroskopu a pořízení snímků použitých v této práci a RNDr. Markovi Tuhému, Ph.D. za pořízení snímků binokulární lupou, též použitých v této práci. Poděkování také patří prof. RNDr. Milanu Matolínovi DrSc. za návrh pojmenování poměru příkonů gama záření. Děkuji také Ing. Martinu Přečkovi Ph.D. (ELI Beamlines) za pomoc s výběrem měřících lahvíček pro laboratorní gama spektrometrii. Zároveň bych chtěla poděkovat svému příteli a rodině za trpělivost a podporu při psaní bakalářské práce.

## **Abstrakt**

V Jáchymově se mezi lety 1853 a 1939 vyráběly v průmyslovém měřítku pestrobarevné a velmi žádané uranové barvy. Až do objevu rádia Marií Curie Skłodowskou roku 1898 byl odpad z výroby považován v podstatě za bezcenný.

V 70. letech 20. století bylo zjištěno užití materiálů se zvýšenou radioaktivitou v budovách v Jáchymově. Některé nejvíce postižené budovy byly zbourány. V 90. letech došlo k sanačním zásahům, během kterých byly z většiny budov tyto stavební materiály (omítky a malty) odstraněny. V tomto období byly měřeny příkony záření gama i aktivity rádia a uranu laboratorně. Nebyl zkoumán mineralogický a fázový charakter materiálu, což bylo u této bakalářské práce hlavním cílem.

Předpoklad zachování alespoň některých pozůstalých domů byl minimální. Přesto se několik málo unikátních případů nalézt podařilo. Túrou o délce 12 km bylo nalezeno celkem 11 budov, jejichž omítky vykazovaly zvýšenou radioaktivitu a to v rozmezí 3,2 – 28,4  $\mu\text{Gy/h}$ . Odběr vzorků byl realizován u 6 z nich. Stanovení hmotnostních aktivit  $^{226}\text{Ra}$  bylo provedeno laboratorní gama spektrometrií, obsahy uranu byly stanoveny instrumentální neutronovou aktivační analýzou. Ve studovaném souboru dosahovaly aktivity radia hodnot 0,12 až 5,25 % eU. Koeficienty radioaktivní rovnováhy jsou výrazně posunuty ve prospěch  $^{226}\text{Ra}$  a pohybují se v rozmezí 205 – 941 %, kromě domu číslo 5, kde byla omítka blízko stavu Ra/U rovnováhy. Koeficienty emanace jsou nízké, v rozmezí  $< 0,5 - 7,47$  %.

Hlavním nositelem radia v omítkách jsou strusky, použité jako ostřívo. V rentgenové difrakci a obrazu elektronového mikroskopu se projevují jako amorfní fáze (sklo) s příměsí cristobalitu ( $\text{SiO}_2$ ), troilitu ( $\text{FeS}$ ) a kubického  $\text{UO}_2$  (uraninitu s.s.). Je to silikátová struska pocházející z hutnění stříbra, kam byl tehdy i podle dobových záznamů tento materiál občas přidáván.

## **Klíčová slova**

Omítka, radioaktivita, Jáchymov, uranová továrna, uranové barvy, radium, Ra-226, stavební materiál.

## **Abstract**

Between 1853 and 1939, colourful and highly sought-after uranium paints were produced on an industrial scale in Jáchymov. Until the discovery of radium by Marie Curie Skłodowska in 1898, the waste from production was considered essentially worthless.

In the 1970s, the use of materials with increased radioactivity was detected in buildings in Jáchymov. Some of the most affected buildings were demolished. In the 1990s, remediation interventions took place during which these building materials (plaster and mortar) were removed from most of the buildings. During this period, gamma radiation doses as well as radioactivity and uranium were measured in the laboratory. The mineralogical and phase character of the material was not investigated, which was the main objective for this bachelor thesis.

The presumption of preservation of at least some of the surviving houses was minimal. Nevertheless, a few unique cases have been found. A total of 11 buildings were found along a 12 km tour whose plaster showed elevated radioactivity ranging from 3.2 to 28.4  $\mu\text{Gy/h}$ . Sampling was carried out at 6 of them. Determination of  $^{226}\text{Ra}$  mass activities was performed by laboratory gamma spectrometry, uranium contents were determined by instrumental neutron activation analysis. In the study set, the radium activities reached values of 0.12 to 5.25 % eU. The radioactive equilibrium coefficients are significantly shifted in favour of  $^{226}\text{Ra}$  and range from 205 to 941 %, except for house number 5, where the plaster was close to the Ra/U equilibrium state. The emanation coefficients are low, ranging from < 0.5 - 7.47 %.

The main carrier of radium in plasters is slag, used as a sharpening agent. In X-ray diffraction and electron microscope images they appear as amorphous phases (glass) with admixtures of cristobalite ( $\text{SiO}_2$ ), troilite ( $\text{FeS}$ ) and cubic  $\text{UO}_2$  (uraninite s.s.). It is silicate slag from silver smelting, where this material was sometimes added at the time and according to contemporary records.

## **Key words**

Plaster, radioactivity, Jáchymov, uranium factory, uranium colours, radium, Ra-226, building material.

## Obsah

1 Úvod.....	1
2 Historie města Jáchymov .....	2
2.1 Historie Uranové továrny .....	3
2.1.1 Výroba světložluté uranové žluti.....	4
2.1.2 Radium .....	5
3 Případy využití surovin se zvýšenou radioaktivitou ve stavebnictví .....	7
3.1 Použití <sup>60</sup> Co jako součást stavebním materiálu na Taiwanu .....	7
3.2 Domy START .....	7
3.3 Pórobeton z Poříčí u Trutnova.....	8
3.4 Jáchymovské omítky .....	8
3.4.1 Sanace jáchymovských domů.....	9
4 Metodika .....	10
4.1 Terénní radiometrická túra.....	10
4.2 Terénní gama spektrometrie .....	11
4.3 Odběr vzorků.....	12
5 Laboratorní metody .....	14
5.1 Příprava vzorků pro analytické metody.....	14
5.2 Laboratorní gama spektrometrie.....	15
5.2.1 Test těsnosti skleněných 2 ml lahviček .....	16
5.2.2 Měření vzorků omítek na gama spektrometru .....	18
5.3 Instrumentální neutronová aktivační analýza: INAA .....	19
5.3.1 Instrumentální neutronová aktivační analýza .....	19
5.4 Makrofotografie omítek.....	20
5.5 Prášková rentgenová difrakce.....	20
5.6 Elektronová mikroskopie a mikroanalýza .....	20
6 Výsledky .....	21
6.1 Terénní radiometrická túra.....	21
6.2 Terénní gama spektrometrie .....	23
6.3 Laboratorní gama spektrometrie.....	26
6.4 Instrumentální neutronová aktivační analýza .....	27
6.5 Porovnání laboratorní gama spektrometrie a INAA, koeficient radioaktivní rovnováhy a koeficient emanace .....	28
6.7 Makroskopický popis omítek .....	29

<b>6.6 Prášková rentgenová difrakce.....</b>	<b>30</b>
<b>6.8 Elektronová mikroskopie a ED analyzátozem.....</b>	<b>33</b>
<b>6.7 Struska.....</b>	<b>35</b>
<b>7 Diskuse.....</b>	<b>36</b>
<b>9 Seznam literatury a zdrojů.....</b>	<b>40</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Uranové barvy (zleva: dva druhy světlé uranové žluti, uranová oranž a amoniaková žlut'). Ze sbírek Geologického pavilonu VŠB-TU Ostrava. Foto J. Jirásek 2008.

Obr. 2: Uranové barvy. Muzeum Jáchymov. Foto V. Goliáš 2000.

Obr. 3 (vlevo): Továrna na výrobu uranových barev kolem roku 1900. Zdroj: osobní archiv J. Ochece.

Obr. 4 (vpravo): Radiový preparát z Jáchymova. Zdroj: 40 let ČESKOSLOVENSKEHO URANOVÉHO PRŮMYSLU, ČSOP 1985.

Obr. 5: Historická mapa města Jáchymov z roku 1842. Mapová sbírka PŘF UK.

Obr. 6: Terénní scintilační radiometr RP-103 se scintilační sondou NaI(Tl) typu RFS 108 (ZMA). Foto M. Vohánková 2023.

Obr. 7: Měření zdi gama spektrometrem GT-32. Foto V. Goliáš 2022.

Obr. 8: Odběr vzorků omítek vrtačkou s diamantovou jádrovou vrtnou korunkou o průměru 5,5 cm. Foto V. Goliáš 2022.

Obr. 9: Vyvrtaný otvor ve zdi domu č. 7 po odběru vzorku. Foto V. Goliáš 2022.

Obr. 10: 2 ml skleněné lahvičky použité pro stanovení  $^{226}\text{Ra}$  v pevných vzorcích. Foto M. Vohánková 2023.

Obr. 11: Graf poklesu gama aktivity radonové vody ve skleněné 2 ml lahvičce bez hliníkové fólie.

Obr. 12: Graf poklesu gama aktivity radonové vody ve skleněné 2 ml lahvičce s hliníkovou fólií.

Obr. 13: Sloupcový Graf dávkových příkonů záření gama v maximu ve srovnání s přirozeným pozadím.

Obr. 14: Královská mincovna Jáchymov, záběr z ulice Mincovní. Foto M. Vohánková, 2022.

Obr. 15: Detailní záběr na oblast zvýšených dávkových příkonů záření gama na budově Královské mincovny (muzeum) a hlavní oblast zdroje záření, která tvoří souvislý pás okolo červeně zbarveného sklepního okna; vyznačeno zeleným obrysem. Foto M. Vohánková, 2022.

Obr. 16: Sloupcový graf gradientu úbytku dávkového příkon záření gama na měřených domech v Jáchymově.



Obr. 17: Energetická spektra záření gama naměřená na domu č. 1 (kontakt se zdí, 1 metr od zdi a pozadí) a popis hlavních maxim ( $^{214}\text{Bi}$  a  $^{214}\text{Pb}$ ).

Obr. 18: Foto omítky obsahující strusku pořízené pod binokulární lupou (dům č. 8). Nahoře lícová strana omítky, dole kontakt se zdivem se „zátekem“ malty mezi kameny. Foto Marek Tuhý 2023.

Obr. 19: Detailní záběr na omítku z foto Obr. 18. Ve strusce je viditelná fluidální textura a bublinka. Foto Marek Tuhý 2023.

Obr. 20: Difrakční záznam vzorku OJ-6 (dům č. 7).

Obr. 21: Difrakční záznam vzorku OJ-10 (NAV).

Obr. 22: Difrakční záznam vzorku OJ-14 (struska z domu č. 1).

Obr. 23: Difrakční záznam vzorku OJ-14 (struska z domu č. 1).

Obr. 24: Zrno strusky s bublinou a sulfidovou kuličkou ( $\text{FeS}$ ), vzorek NAV.

Obr. 25: Framboid krychliček  $\text{UO}_2$  (uraninit s.s.) ve strusce z omítky z domu číslo 3 (vzorek OJ-13).

## Seznam tabulek

Tab. 1: Certifikované obsahy uranu a aktivity radia ve standardech BL-2 a BL-5 (Igles a kol. 1977, Steger a kol. 1979) a aktivity radia přepočtené na % eU.

Tab. 2: Výsledky radiometrické túry a naměřené dávkové příkony záření gama v maximu ve srovnání s přirozeným pozadím radiometrem RP 103.

Tab. 3: Výsledky terénní gama spektrometrie na domech v Jáchymově (kontakt, 1 m, pozadí, poměry).

Tab. 4: Porovnání výsledků laboratorní gama spektrometrie a INAA, koeficienty radioaktivní rovnováhy a koeficienty emanace.

Tab. 5: Výsledky práškové RTG difrakce s rozlišením hlavních, vedlejších a minoritních fází obsažených ve vzorcích omítek a separovaných strusek.

Tab. 6: Prvkové složení strusek a omítky z domu č. 5 a chemická povaha obsažených inkluzí, kvalitativně stanovené ED analýzou.

## **Použité zkratky**

BGO	germanát bismutu ( $B_4Ge_3O_{12}$ )
ED	energieově disperzní
EDS	energieově disperzní spektrometrie
GPS	Global Positioning System
ICDD	The International Centre for Diffraction Data
INAA	instrumentální neutronová aktivační analýza
LDPE	Low Density Polyethylene
PDF	Powder Diffraction File
PřF UK	Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy
PTFE	polytetrafluorethylen
RTG	rentgen
SEM	skenovací elektronový mikroskop
ÚGMNZ	Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů
ÚPSG	Ústav petrologie a strukturní geologie
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu

## 1 Úvod

Jáchymov patří k místům, v nichž se příběhy našich dějin koncentrují zcela mimořádným způsobem. Díky bohaté ložiskové mineralizaci stříbra na tomto území se během dvou století stalo z původní osady Konradsgrün svobodné horní město s ražebním právem. Dnes již málo osídlené městečko, fungující především jako lázně se mohlo v dobách nástupu Habsburků na český trůn chlubit titulem druhého největšího města v Čechách. Hostilo mnoho učenců a znalců své doby, díky nimž byly dosaženy mnohé pokroky a objevy. Jedním z revolučních objevů byl vývoj postupu výroby pestrých uranových barev. Ty sehrály v historii naší země včetně bývalé Rakousko-uherské monarchie poměrně významnou roli. Přinášely nejenom peníze do státní pokladny, ale i slávu hornickému městu Jáchymov. Tímto však bohatá historie Jáchymova nekončí. Ne každé dějiny jsou ovšem takto pozitivní. Jáchymov se během druhé světové války zapsal do paměti lidí jakožto místo s velmi ponurou historií pracovních táborů.

Cílem práce bylo nalézt domy, které nepodlehly sanacím provedených na asi 100 budovách v 90. letech minulého století kvůli použití radioaktivního materiálu na jejich stavbu a zjistit jejich radiometrické vlastnosti a mineralogický charakter.

V první části práce je stručně nastíněna bohatá historie města Jáchymov, od založení původní osady v roce 1300 po konec těžební éry v roce 1964. Dále jsou zmiňovány důležité objevy, jež postupně vedly k činnosti továrny a výrobě uranových barev. Další z kapitol se věnuje postupu výroby uranových barev dle Adolfa Patery. Rešeršní část práce je zakončena příklady použití nevhodných stavebních materiálů v naší historii. Praktická část se věnuje metodice vyhledávání budov, popisu odběru vzorků, laboratorním metodám a vyhodnocení získaných výsledků.

## 2 Historie města Jáchymov

První zmínky a tedy počátky historie této lokality situované v Krušných horách přibližně 15 km severovýchodně od města Karlovy Vary pochází z roku 1300 a hovoří se o ní jako o osadě Konradsgrün. Svůj název nesla osada po Konrádovi z Vohlburgu z nedalekého Chebu. Roku 1516 objevil hrabě Štěpán Šlik na území bývalé osady bohatou ložiskovou mineralizaci stříbra a rozhodl se na místě opuštěné osady založit město Thal (údolí). Původní název města byl však o rok později pozměněn na jméno svatého Jáchyma, St. Joachimsthal, česky Jáchymov. První vyražená štola, jež byla později pojmenována „Nálezna“ byla situována v blízkosti dnešního centra města. Nález stříbrné mineralizace odstartoval skutečnou stříbrnou horečku, jež vedla k založení několika dalších hornických osad v okolních oblastech. Mezi nově založené osady patřily Abertamy, Boží Dar a Pernink. Na soutoku Jáchymovského a Klínoveckého potoka byla v roce 1517 vybudována Lintackerova stříbrnou huť, která byla jednou z největších hutí v Evropě. O čtyři roky později, v roce 1520 dokonce Ludvík II. Jagelonský povýšil Jáchymov na svobodné horní město a udělil mu ražební právo. Nově vzniklé město přilákalo díky bohatému nalezišti kvalitního stříbra řadu horníků nejen z Čech, ale i z přilehlých zemí a Jáchymov tak roku 1534 čítal přes 18 000 obyvatel a stal se druhým nejlidnatějším městem v Čechách, hned po Praze. Město se stalo významným kulturním centrem a hostilo mnoho významných osobností své doby, jako byl například německý učenec a autor slavné hornické příručky „Bermannus sive de re metallica dialogus“ Georgius Agricola, znám též jako otec mineralogie. Kromě malého množství vzorků stříbra uložených ve světových muzejních sbírkách se v Kunsthistorische Museu ve Vídni dochovalo několik kusů takzvaných „handštajnu“. Jsou to umělecká díla zhotovená z rud nejvyšší kvality. Tyto skulptury připomínající svým tvarem jakési kalichy, vázy či postavy svatých byly vyrobeny ze stříbra a argentitu a zdobeny různými dalšími stříbrnými minerály (stefanitem, proustitem) a obvykle vyobrazovaly biblické scény (Eyles 1956, Škácha a kol. 2019). Dodnes tak ukazují zcela unikátní kvalitu historicky těžných rud i tehdejší mistrovství jejich zhotovitelů.

Pro ražbu stříbrných mincí nechal hrabě Šlik vystavět mincovnu a tím byla odstartována éra Jáchymovského tolaru (Thaler), jehož název se časem vžil i jako název americké měny dolar. Roku 1716 byla v Jáchymově založena světoznámá hornická škola. Prvotní zájem o stříbro časem s vyčerpáním ložiska vystřídal těžba kobaltu, niklu a vizmutu. V pozdějších dobách tyto prvky ustoupily rozsáhlému zájmu o pestrobarevné uranové barvy, které se staly středem pozornosti. K poslednímu velkému rozmachu v těžbě došlo po druhé světové válce, kdy se uran

ve velkém exploatoval, upravoval a exportoval do SSSR. Ložisko bylo vyčerpáno a těžba byla definitivně ukončena roku 1964 (Veselý 1985, Veselovský a Ondruš 1997).

## 2.1 Historie Uranové továrny

Uraninit je znám z Krušných hor a byl poprvé popsán v 16. století horníky hraběte Šlika jako těžký černý minerál, jež svým vzhledem velmi připomínal tmavou pryskyřici. Vzhledem k této podobě byl pojmenován smolinec. Horníci se s ním již setkali při těžbě stříbra. Švédský chemik Axel Fredrik Cronstedt jej mylně zaměňoval za odrůdu stříbrné rudy. K tomuto omylu došlo pravděpodobně z důvodu, že smolinec byl často nacházen ve spojení se stříbrem či galenitem obsahujícím stříbro, ale býval vyřazován pro svou nedostatečnou kvalitu a nemožnost zpracování. Alfred Werner zas smolinec považoval za železnou rudu a nazval jej železnou smolkou (Balling 2013). Další z teorií bylo, že smolinec je ve skutečnosti ruda zinku.

Roku 1789 německý chemik Martin Heinrich Klaproth popsal rozborem smolince nový prvek uran a také izoloval oxid uraničitý  $UO_2$ . Tato ruda byla těžena společně se stříbrem z jáchymovských dolů. O objevu nového kovového prvku informoval dne 24. září 1789 u zasedání Královské akademie v Berlíně. Kovový uran se podařilo izolovat francouzskému chemikovi E. Peligotovi až roku 1840 redukcí chloridu uraničitého draslíkem (Poková 1994). Svůj název dostal tento prvek podle nedávno objevené planety Uran. V této době byla těžba stříbrných rud v Jáchymově na ústupu, zatímco uranová ruda se stávala centrem zájmu.

Produkty smolince byly nejprve díky svým pestrým barvám zpracovávány pro výrobu barviv používaných ve sklářském a keramickém průmyslu. Poptávka po těchto barvách byla vysoká, v Jáchymově se ovšem prodávala pouze ruda smolinec bez dalšího průmyslového zpracování (René 2018). Výroba zpočátku probíhala v malém měřítku a byly testovány různé postupy zpracování. Zvrat ve výrobě uranových barev nastal s příchodem rakouského hutního chemika a později profesora příbramské báňské akademie Adolfa Pateru, který přišel s revoluční metodou levné výroby uranových barev (Patera 1854). Testování postupu započalo roku 1847 a do roku 1853 bylo vyrobeno 1500 kg uranové žluti vysoké kvality (Škácha a kol. 2019, Veselovský a Ondruš 1997). V témže roce byla v Jáchymově obnovena důlní činnost za účelem těžby uranové rudy pro výrobu barev. Do této doby byl smolinec vybírán z hald po těžbě stříbra. Průmyslová výroba byla spuštěna v říjnu roku 1855, dle Paterova návrhu. Později, v roce 1871 byla továrna přesunuta do prostor bývalé Lintackerovy stříbrné huti z roku 1517 a byla přejmenována na „Císařskou a královskou továrnu na produkci žluté uranové barvy“ (K. k. Urangelbfabrik) (Škácha a kol. 2019). Nejprve byl sortiment nabízených barev velmi

omezený pouze na uranovou žlut', později se však do nabídky dostaly i další uranové barvy a sloučeniny, za což se zasloužil český hutní chemik Arnošt Vysoký. Výroba uranových barev kolísala, produkovalo se 5-10 tun uranových barev ročně, což byla v této době světově nejvýznamnější produkce.

Průmyslové využití smolince se významně promítlo do ceny produktů. V uranové továrně (Obr. 3) bylo od roku 1847 do konce 19. století vyrobeno přibližně 160 tun uranových barev v hodnotě zhruba 3 miliony rakousko-uherských zlatých. Při přepočtu na dnešní cenu stříbra by hodnota jedné zlatky byla cca 150 Kč. Produkty byly velmi žádané, což podmínilo k přestavbě a modernizaci továrny pro efektivnější výrobu. Jáchymovská továrna se stala největší svého druhu na světě (Duraj a kol. 2019). Uranové barvy byly natolik žádané, že začaly vznikat další továrny v Cornwallu, Portugalsku a Belgii. Do roku 1945, tedy do konce druhé světové války se v Jáchymově vytěžilo okolo 600 tun uranové rudy. Celkem bylo od roku 1853 do konce těžby roku 1964 vytěženo 8500 tun (<https://www.zdarbuh.cz/reviry/jd/jak-se-v-jachymove-dobyval-uran/>).

### **2.1.1 Výroba světložluté uranové žluti**

Surový materiál, jež obvykle obsahoval přibližně 40 % smolince, byl nejprve nadrcen a namlet do formy prášku. Následně byl tento prášek pražen, za účelem vypuzení síry, arzenu a dalších nežádoucích prvků. Druhé pražení sodou a ledkem vedlo k oxidaci čtyřmocného uranu na šestimocný (uranát). Po vypražení byla přebytečná soda a sodné soli síry a arzenu vymyty horkou vodou. Následovalo louhování s kyselinou sírovou s malou příměsí kyseliny dusičné (rozpuštění uranu) a následnému oddělení vzniklého roztoku síranu uranylu od nerozpuštěných zbytků filtrací. Tyto zbytky obsahovaly téměř veškeré rádium. Roztok surového síranu uranylu byl v dalším kroku přesycen sodou, čímž se většina prvků vysrážela a uran se rozpustil do podoby karbonátového komplexu. Zfiltrovaný surový sodový roztok se několik hodin vařil, pro dosažení tepelného rozkladu hydrogenuhličitanů některých nečistot, jako jsou například vápník, železo, či hořčík, na nerozpustnou sraženinu. V průběhu neutralizace vyčištěného roztoku komplexu uranylkarbonátu zředěnou kyselinou sírovou byla vysrážena uranová žlut' (diuranát sodný). Promytá sraženina byla nakonec vysušena a rozemleta na výsledný žlutý prášek (Obr. 1 a 2) (Vobecký 1999).



Obr. 1: Uranové barvy (zleva: dva druhy světlé uranové žluti, uranová oranž a amoniaková žluť). Ze sbírek Geologického pavilonu VŠB-TU Ostrava. Foto J. Jirásek 2008.



Obr. 2: Uranové barvy. Muzeum Jáchymov. Foto V. Goliáš 2000.

## 2.1.2 Radium

Zlomovým byl pro Jáchymov rok 1898, kdy Marie Curie Skłodowskou se svým manželem Pierem Curie izolovali radium a polonium ze zbytků po výrobě Jáchymovských uranových barev, jež si nechali zaslat do své výzkumné laboratoře ve Francii. Tímto významným objevem nabyl odpad z výroby uranových barev na obrovské hodnotě, jakožto výzkumný materiál. Marie Curie se svým manželem postupně ručně zpracovali 26 tun odpadu z jáchymovské uranové továrny (Duraj a kol. 1990). Pro získání jednoho gramu rádia bylo teoreticky zapotřebí 3,5 tuny smolince. Obecný postup pro získání rádia ze smolince probíhá dle Vobeckého 1999 v následujících krocích. Kroky 1-4 jsou totožné s postupem výroby uranové žluti.

- 5) separace baryum-radiové frakce od nerozpustného minerálního zbytku přeměnou síranů na uhličitany a čištění tohoto radiového koncentrátu
- 6) izolace rádia z baryového nosiče

Výše uvedené kroky (1 až 4) popisující tepelné zpracování a loužení uranu byly důležitými v procesu výroby uranové žluti, dle postupů Adolfa Patery.

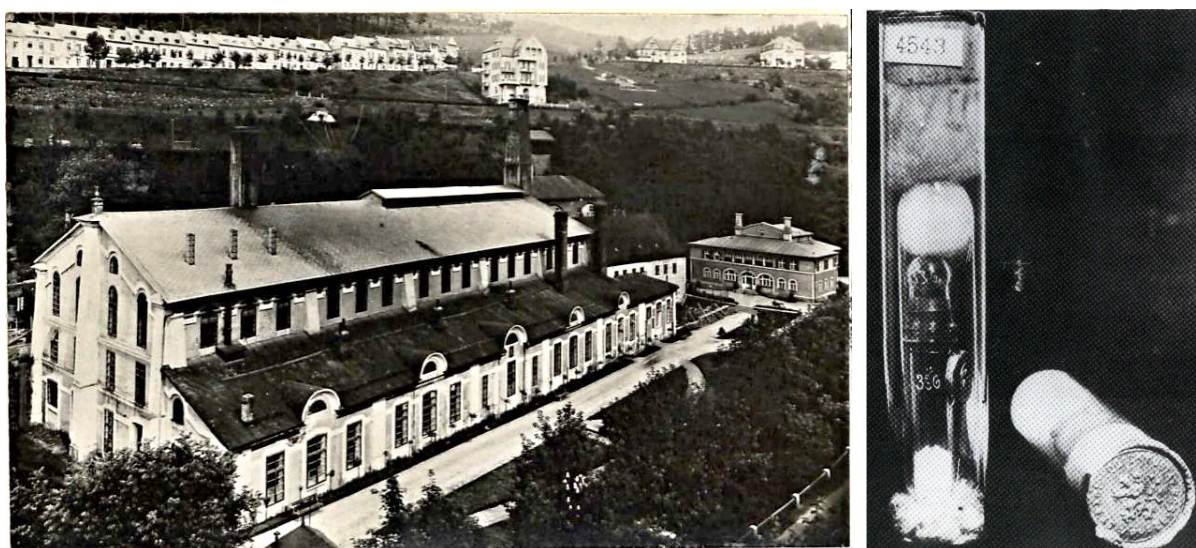
Ke konci 19. století začal zájem o uranové barvy klesat a továrna přestala prosperovat. Po objevu  $^{226}\text{Ra}$  stoupla naopak poptávka a po tomto nově objeveném prvku. Jelikož se zjistilo, že nádorové buňky jsou citlivé na ozáření a radium má léčivé účinky, stalo se rychle populárním a velmi žádaným medikamentem. Toto byl počátek radiové horečky, jež zachvátila téměř celý svět. Rádium bylo přidáváno do kosmetiky a dokonce i do potravin. První zaznamenaná produkce rádia v Jáchymově se datuje k roku 1909. Až do roku 1913 zde byl držen světový monopol ve výrobě radiových solí, což přinášelo rakousko-uherské monarchii významné zisky.



Továrna na uranové barvy byla přestavěna a zmodernizována pro účely výroby rádia. Jelikož Marie Curie neměla patent na výrobu, nebyl problém využívat jejích pracovních postupů. Každý rok byly v továrně vyrobeny přibližně 2-7 gramů rádia (Obr. 4). Konec radiové horečky nastal s předávkováním Američanem Ebenem Beyersem radiovým přípravkem „Radithor“, po jehož nadměrném tříletém užití došlo u muže k vypuknutí leukémie a následné smrti (Macklis 1990).

Výroba uranových barev i rádia v Jáchymově byla definitivně ukončena roku 1939 a několik set let stará budova byla o rok později zbořena (Duraj a kol. 1990).

Produkce rádia činila od roku 1909 do roku 1945 celkem 77 g (Škácha a kol. 2019).



Obr. 3 (vlevo): Továrna na výrobu uranových barev kolem roku 1900. Zdroj: osobní archiv J. Ochece.

Obr. 4 (vpravo): Radiový preparát z Jáchymova. Zdroj: 40 let ČESKOSLOVENSKÉHO URANOVÉHO PRŮMYSLU, ČSUP 1985.

### **3 Případy využití surovin se zvýšenou radioaktivitou ve stavebnictví**

#### **3.1 Použití $^{60}\text{Co}$ jako součást stavebním materiálu na Taiwanu**

Jáchymov není jediný místem, kde byl radioaktivní stavební materiál použit na stavbu obytných domů. Koncem roku 1982 byla na severním Taiwanu ve velkém recyklována ocel neznámého původu, avšak obsahující nadměrné množství radionuklidu  $^{60}\text{Co}$ . Tato radioaktivní látka vzniká například jako vedlejší produkt v jaderných elektrárnách, při neutronové aktivaci přírodního izotopu  $^{59}\text{Co}$ . Kvůli nesprávné manipulaci s ocelovým odpadem kontaminovaným  $^{60}\text{Co}$  bylo tímto způsobem vyprodukováno několik stovek tun ocelových armovacích tyčí, určených jako výztuže do zdí na stavbu apartmánů, rodinných domů, škol a dalších veřejných budov. Takto upravené ocelové výztuže byly poté distribuovány do celé země a použity jako stavební materiál. Budovy, do jejichž konstrukce byly použity ony ocelové tyče později obývalo či pravidelně navštěvovalo přes 10 000 občanů Taiwanu. Lidé osídlující budovy byli po dobu až dvaceti let vystavováni záření gama způsobené radioizotopem  $^{60}\text{Co}$ , obsaženém v konstrukcích jednotlivých budov.

Dávky záření se měnily v závislosti na jednotlivých budovách, či bytech a délce trvání pobytu v nich. Ačkoliv byla efektivní dávka, jež obyvatelé obdrželi velmi vysoká (18 – 525 mSv/rok, průměrně 40 mSv/rok) (Orient 2014), byly překvapivě negativní projevy účinků záření, jako je například pozitivní nález rakoviny a později smrt ozařované osoby postupně čím dál tím méně časté, až byla úmrtnost na rakovinu prakticky nulová (Orient 2014, Chang a kol. 1997, Hwang a kol. 2001). (Roční limit pro celkové ozáření civilních obyvatel v ČR je dle vyhlášky 422/2016 Sb. O radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje 1 mSv/rok). Vzhledem ke krátkému poločas rozpadu  $^{60}\text{Co}$  (5,27 let) se dávky postupně snižovaly (Robinson 2013).

Od roku 1992 bylo nalezeno přes 100 veřejných budov a 1000 bytů se zvýšeným gama zářením, způsobeným přítomností  $^{60}\text{Co}$  ve stavební oceli. Pozorování obyvatel a diagnostika rakoviny probíhala mezi lety 1982 až 2005. Během celého časového období činil průměr úmrtí na rakovinu 3,5 osoby na 100 000 ozářených obyvatel ročně. Ve srovnání se 116 úmrtími ročně na 100 000 neozářených obyvatel byla úmrtnost u ozářené části populace 33krát nižší (Robinson 2013).

#### **3.2 Domy START**

Mezi lety 1972 až 1983 byly ve společnosti n. p. Prefa Hýskov v závodě Rynholec vyráběny škvárobetonové panely, jež byly následně použity při stavbě zhruba tří tisíc rodinných domů typového označení START. K výrobě těchto panelů byla použita škvára z bývalé elektrárny

Rynholec, jež odebírala materiál z dolu Anna. Jelikož se důl nachází v oblasti Kladensko – rakovnické uhelné pánve, kde jsou některé uhelné sloje obohaceny uranem, došlo ke kontaminaci škvárobetonových prefabrikátů. Hmotnostní aktivita  $^{226}\text{Ra}$  v těchto panelech dosahovala hodnot 1 – 4 kBq/kg. Dávkový příkon záření gama na povrchu panelů byl v rozmezí 0,5 až 2  $\mu\text{Gy/h}$ . V roce 1987 provedl státní zdravotní ústav radiometrické měření a byty byly označeny za zdravotně závadné (Thomas 1996, Hůlka a kol. 2008).

### 3.3 Pórobeton z Poříčí u Trutnova

Mezi lety 1963 a 1980 bylo postaveno cca 20 000 domů z pórobetonu o hmotnostní aktivitě  $^{226}\text{Ra}$  až 1 kBq/kg. Jako příčina vysoké hmotnostní aktivity  $^{226}\text{Ra}$  byl označen popílek pocházející z elektrárny v Poříčí, spalující černé uhlí z Žacléřsko – svatoňovické uhelné pánve, například i ze sloje Baltazar. Tato sloj, podobně jako několik dalších, je však lokálně mineralizovaná uranem. Radioaktivní pórobeton se zvýšenou radioaktivitou použitý na stavbu domů tvořil naštěstí jen malou část použitých materiálů a díky tomu byl limit koncentrace radonu uvnitř budov překročen jen u 1 – 2 % z těchto staveb (Hůlka a kol. 2008).

### 3.4 Jáchymovské omítky

V 70. letech 20. století bylo provedeno radiometrické měření jáchymovských domů, které odhalilo vysoké dávkové příkony záření gama. Jelikož v té době nebyla žádná legislativa týkající se radioaktivity, byly domy o nejvyšších hmotnostních aktivitách zbourány. V roce 1988 byl jeden z opuštěných jáchymovských domů určených k rekonstrukci podroben gama spektrometrickému měření, při němž byla zjištěna vysoká aktivita záření gama a vysoké koncentrace  $^{222}\text{Rn}$  (Thomas a Moučka 1993). Vysoké koncentrace radonu lze vysvětlit buď vystavěním budovy na hlušině z dolů (v tomto případě by půda pod domem sloužila jako jakýsi rezervoár radonu) nebo použitím odpadního materiálu po těžbě na stavbu domů či na srovnání terénu (Čechák a kol. 2008).

Z odpadu po výrobě barev byly některé zbytky použity jako přísada do omítek a malt (Hůlka a Thomas 1999). Hrubé frakce byly používány pro výplně podlah a drobnější kousky jako přídavek do malt a omítek (Thomas a Moučka 1993). Po gama spektrometrických měřeních bylo odhaleno dalších asi 100 domů, kde dávkové příkony záření gama uvnitř budov dosahovaly hodnot 0,15 – 20  $\mu\text{Gy/h}$ . V Jáchymově stálo tou dobou asi 700 domů, tedy každý 7. dosahoval vysokých aktivit záření gama (Čechák a kol. 2008). Hmotnostní aktivity  $^{226}\text{Ra}$  v omítkách těchto domů byly okolo 300 kBq/kg (Thomas a Moučka 1993). Nalezen byl i extrémní případ, kdy omítka dosáhla 1 MBq/kg a dávkové příkony záření gama uvnitř této

budovy činily 10-100  $\mu\text{Gy/h}$ . Uvnitř zdí odhalených budov lze nalézt různé radioaktivní kameny, ale radioaktivní může být i malta mezi nimi. Dosavadní diagnostická měření gama spektrometrie in-situ poskytovala nedostatečné informace o zdrojích gama záření uvnitř domů. Je obtížné rozlišit, zda je zdrojem omítka, malta, cihly, či kámen. Důvodem je velmi vysoké pozadí gama. Nejlepším současným způsobem ke stanovení radionuklidů jsou laboratorní metody (Čechák a kol. 2008).

### **3.4.1 Sanace jáchymovských domů**

Nápravná opatření byla provedena v 90. letech, kdy došlo k podrobné diagnostice a sanaci (odstraněním radioaktivních částí) (Hůlka a Thomas 1999).

Jako nejlepší způsob snížení dávkových příkonů gama záření bylo zvoleno odstranění radioaktivních částí omítek. To je ovšem velmi pracné a drahé. Na několika domech bylo dokonce studováno, zda-li je možné snížit dávkové příkony záření gama až na hodnotu přirozeného pozadí. I přes fakt, že sanované omítky byly vyspraveny z materiálů o nízkých obsazích radionuklidů, ve většině případů nebylo možné odstranit materiály, jež tvoří nosné konstrukce a tedy zcela eliminovat záření gama způsobené použitím nevhodného stavebního materiálu.

Radioaktivní malta byla vyškrabávána ze spár tak, aby zbylé množství bylo co nejmenší. Před sanací byly aktivity  $^{226}\text{Ra}$  ve spárovací maltě a směsi kamenů okolo 6000 Bq/kg a v omítkách 1900 Bq/kg (Thomas a Moučka 1993)

Po sanaci byly dávkové příkony zhruba na poloviční hodnotě oproti stavu před sanací. Výsledné dávkové příkony nabývaly hodnot pod referenční úrovní pro stávající budovy (1  $\mu\text{Gy/h}$ ).

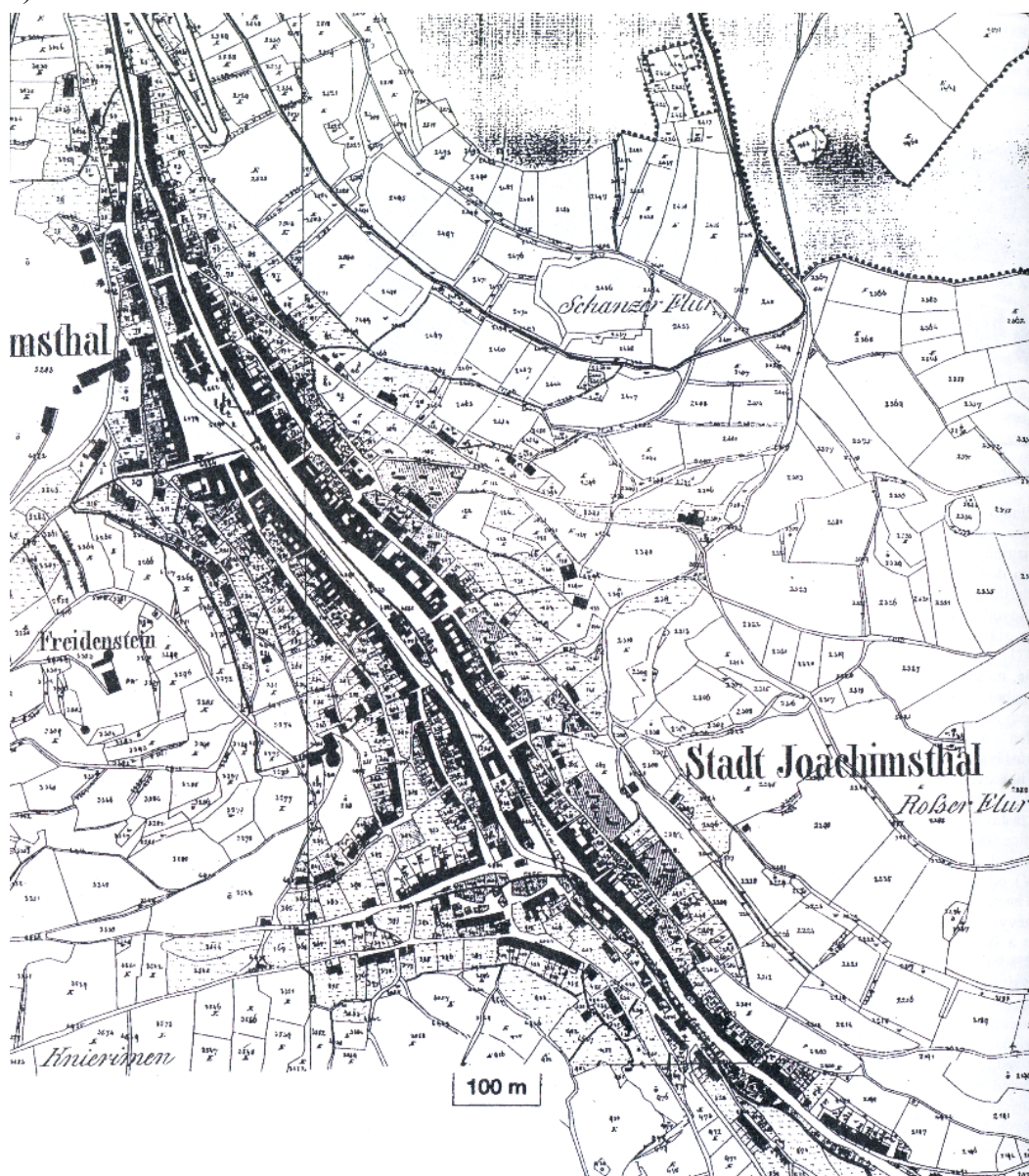
Jako alternativa k odstranění záření byl testován účinek stínění vápenato pískovými cihlami o tloušťce 7 nebo 15 cm, jež byly umístěny před původní stěnu. Poměr mezi dávkovými příkony po sanaci a před sanací byl v případě 7 cm silné cihly cca 0,54. Dávkové příkony po sanaci byly skoro poloviční. V případě 15 cm silných cihel činil poměr 0,66 (Čechák a kol. 2008).



## 4 Metodika

### 4.1 Terénní radiometrická túra

Ještě před zahájením výzkumu bylo jasné, že po provedení sanací v 90. letech 20. století bude vyhledání radioaktivních stavebních materiálů v Jáchymově obtížné, resp. takové materiály se zde budou vyskytovat již pouze vzácně. Pro vyhledání stavebních materiálů, k jejichž zhotovení mohl být použit odpad z Jáchymovské uranové továrny, bylo nezbytné provést rozsáhlé terénní měření úhrnné aktivity gama radiometrem a to u veškerých staveb v Jáchymově, které byly postaveny mezi lety 1847 a 1898, tedy v časovém rozmezí počátku výroby uranových barev v Jáchymově a objevem radia Marií Curie Skłodowskou. K tomuto účelu byla využita historická mapa města Jáchymov z roku 1842 z mapové sbírky PřF UK (Obr. 5).



Obr. 5: Historická mapa města Jáchymov z roku 1842. Mapová sbírka PřF UK.

Detekce těchto míst byla provedena pěší vyhledávací túrou za použití terénního scintilačního radiometru RP 103 se scintilační sondou NaI(Tl) typu RFS 108, ZMA Ostrov nad Ohří (Obr. 6). Během celkem tří túr a byla měřena úhrnná aktivita záření gama (imp/s). Detekovaná četnost je úměrná obsahu všech tří radioaktivních prvků (K, U, Th). Úhrnná aktivita záření gama byla následně přepočtena na dávkový příkon záření gama (nGy/h), dle hrubé detekční účinnosti přístroje ( $1 \text{ imp/s} = 2 \text{ nGy/h}$ ).

Vyhledání jednotlivých budov probíhalo průchodem v těsné blízkosti staveb v cca metrové vzdálenosti od fasád se zapnutým radiometrem. Průběžně byla sluchátky zaznamenávána aktuální intenzita ionizujícího záření, jejíž zvýšená četnost indikovala možný výskyt radioaktivního stavebního materiálu v okolí detektoru. Následně byl na budově nalezen bod maximální intenzity gama záření, jež se zpravidla vyskytoval v geometrickém středu pole anomální intenzity. Do terénního zápisníku byl zaznamenáván datum provedení měření, pořadí nalezeného domu, adresa, GPS pozice, slovní popis lokalizace anomálie a charakter stavebního materiálu domu. Dále maximum záření gama (imp/s) a pozadí (imp/s) v pozici vzdálenější od domu. Ke každé nalezené budově byl do zápisníku připojen náčrtek, jež později usnadnil opětovné nalezení maxima gama záření.



Obr. 6: Terénní scintilační radiometr RP-103 se scintilační sondou NaI(Tl) typu RFS 108 (ZMA). Foto M. Vohánková 2023.

#### 4.2 Terénní gama spektrometrie

Pro terénní gama spektrometrické měření byl během následující terénní akce využit scintilační gama spektrometr GT-32 od firmy Georadis, s BGO krystalem 2x2 in (Obr. 7). Prvním krokem měření bylo vyhledání maxima na každé ze zdí vytipované při vyhledávací terénní radiometrické túře a naměření celkového dávkového příkonu záření gama. Zaznamenávány byly naměřené hodnoty v kontaktu se zdí, jeden metr od zdi a hodnota přirozeného pozadí na vzdálenějším místě od měřeného objektu. Stanovení obsahů radionuklidů (draslíku, uranu,

thoria) tímto měřením není možné, neboť není dodržena geometrie nekonečného poloprostoru, na kterou je přístroj kalibrován. Hodnoty K, U a Th mají tak pouze informativní hodnotu hovořící o charakteru zdroje záření. Veškerá data byla ukládána do paměti přístroje.



Obr. 7: Měření zdi gama spektrometrem GT-32. Foto V. Goliáš 2022.

### 4.3 Odběr vzorků

Odběr vzorků omítek byl prováděn pomocí vrtačky s diamantovou jádrovou vrtnou korunkou o průměru 5,5 cm, jež byla přiložena k omítce, a bylo vrtáno tak dlouho, až se jádro oddělilo od (většinou kamenné) zdi a zůstalo uvnitř vrtné korunky (Obr. 8 a 9).

Během vrtání bylo pro zajištění dostatečné hygieny při práci s materiálem o zvýšené radioaktivitě zavedeno několik opatření. Pracovalo se vždy s respirátorem, jednorázovými laboratorními rukavicemi a během vrtání byla pod místem odběru vždy přidržována plastová miska pro zachycení prachu z omítky. Takto odebraný vzorek byl spolu s lehce odštěpitelnými kousky či prachem z omítky zabalen do jemného papíru a spolu s popiskem daného vzorku vložen do uzavíratelného mikrotenového sáčku. Rukavice byly po každém odběru nahrazeny za nové a veškeré vybavení, jež bylo v kontaktu s materiálem, bylo očištěno a připraveno na další odběr.

Vzorkovány byly zejména staré a opuštěné budovy s poškozenými zdmi a tudíž nebyly nutné větší opravy po odběru vzorků. V některých případech (domy č. 1, 3, 7) bylo možné odebrat



omítku či vzorek malty mezi kameny, kromě nebo namísto vrtání, pouhým odloupením málo soudržné nebo nepřisedlé vrstvy. Podle terénního pozorování tvoří aktivní omítka na zdi bez výhrady vždy první, tedy nejstarší vrstvu, pokud je překryta dalšími novějšími vrstvami mladších omítek. Kromě vzorků omítek a malt byl odebrán i vzorek málo soudržné malty podobného vzhledu jako odebrané vzorky omítek, nalezený radiometrem v hromadě staré navážky poblíž jáchymovského náměstí, označený jako vzorek NAV. Výjimkou byl dům č. 10, na kterém se aktivní omítka vyskytovala, avšak fasáda domu byla nově opravena a odběr by byl v tomto případě příliš destruktivní. Zde bylo možné odebrat pouze malý fragment omítky na poněkud jiném, v té době poškozeném místě. Již v terénu bylo změřením gama signálu tohoto fragmentu jasné, že tento vzorek je neaktivní a posloužil pro naše účely jako vzorek srovnávací.

Z hlediska mechanické pevnosti omítek a malt byla konstatována široká škála, od velmi málo pevných, drolivých typů (dům č. 1), či typů zcela rozsypavých (vzorek navážky NAV, uložený ve stavebním rumu a humusem bohaté půdě) až po typy zcela tvrdé a velmi pevné (dům č. 8), málo pevné, nesoudržné typy však ve vzorkovaném materiálu převládaly. Tyto rozdíly lze přičíst na jak primárnímu složení omítek a malt, tak i pozdějším vlivům zvětrávání, resp. rozdílného vystavení srážkám a dalším atmosférickým vlivům, dle konkrétní polohy a stavebních dispozic domů.



Obr. 8: Odběr vzorků omítek vrtačkou s diamantovou jádrovou vrtnou korunkou o průměru 5,5 cm. Foto V. Goliáš 2022.



Obr. 9: Vyvrtaný otvor ve zdi domu č. 7 po odběru vzorku. Foto V. Goliáš 2022.



## **5 Laboratorní metody**

Jelikož jsme pracovali s materiálem se zvýšenou radioaktivitou, bylo zapotřebí zajistit maximální hygienu při práci, aby nedošlo ke kontaminaci pracovníků, laboratoře a přístrojů. Se vzorky bylo před naplněním do lahvíček nakládáno na omyvatelné ploše, pod odtahem a v laboratorních rukavicích s nasazeným respirátorem. Vzorky odebraných omítek byly podrobeny několika analytickým metodám, jako je gama spektrometrie, instrumentální neutronová aktivační analýza, rentgenová difrakce a elektronová mikroskopie.

### **5.1 Příprava vzorků pro analytické metody**

Pro každou z těchto metod bylo nutné připravit odpovídající množství vzorku v požadované formě a ideálně připravit vzorky pro všechny metody najednou, aby byla zajištěna srovnatelnost alikvotních podílů vzorků pro jednotlivé metody. Je to totiž dosti heterogenní materiál.

Vzorky omítek byly dva dny před plánovaným plněním do skleněných 2 ml lahvíček a mikrozkušavek typu Eppendorf vybaleny a rozloženy pro co nejdokonalejší vyschnutí a zbavení se vlhkosti. Pro dosažení co nejvíce reprezentativních hodnot, byly odděleny od každého vzorku kousky z různých částí odebraného materiálu. Tato relativně heterogenní směs byla v achátové třecí misce lehce nadrcena. Při odběru vzorku omítky z domu číslo 5 byl odebrán i prach vzniklý vrtáním do omítky a ten tedy nebylo nutné dále drit. Z omítky domu č. 3 a z navážky nalezené poblíž náměstí byly ke každému ze vzorků připraveny i duplikáty, právě pro ověření homogenity a reprezentativnosti našich stanovení. Z odebraných kousků omítek byly vyseparovány černé sklovité kousky (dále uváděné jako strusky) pro jejich následnou analýzu a stanovení jejich mineralogicko-fázového charakteru. Všechny lahvičky určené na laboratorní gama spektrometrické měření byly naplněné tak, aby měl vzorek v nich pokud možno stejný objem. Takto naplněná lahvička byla zvážena a byla zaznamenána hmotnost vzorku uvnitř lahvičky. Po zvážení bylo hrdlo lahvičky lehce uzavřeno malým smotkem vaty, aby nedošlo například k vysypání části vzorku a lahvička byla opatřena polepkou s číslem vzorku. Hmotnosti vzorků se pohybovaly v rozmezí 1,734 – 2,401 g. Spolu se vzorky omítek byly naplněny i dvě lahvičky použitými standardy.

Během přípravy vzorků na laboratorní gama spektrometrii byly připraveny i vzorky na instrumentální neutronovou aktivační analýzu (INAA) a práškovou rentgenovou difrakci. Vysušené vzorky odebraných omítek byly postupně třeny na co největší jemnost v achátové třecí misce a v malém množství (cca 100 mg) plněny do mikrozkušavek typu Eppendorf. Objem vzorků se lišil dle hustoty materiálu. Po naplnění byly mikrozkušavky uzavřeny,

zváženy a vzorky určené na INAA byly spolu se seznamem vzorků umístěny do uzavíratelného mikrotenového sáčku. V rentgenové laboratoři byl každý z připravených vzorků určených na práškovou rentgenovou difrakci rozetřen v achátové třecí misce za přídavku acetonu, pro zamezení rozptylu částic vzorku do vzduchu a pipetou nanesen na terčík z monokrystalu křemíku.

Pro účely elektronové mikroskopie byly vzorky strusek lehce podrceny v achátové třecí misce pro získání čerstvých a nezvětralých lomů a spolu se vzorky zkoumaných omítek nanoseny na vodivou pásku a pozice jednotlivých vzorků zakreslena pro pozdější usnadnění identifikace. Podložní sklíčko s vodivou páskou bylo následně pokoveno tenkou vrstvou uhlíku.

## 5.2 Laboratorní gama spektrometrie

Odebraného materiálu bylo ve většině případů malé množství. Aktivita materiálu je relativně vysoká, tady nebylo možné měřit vzorky v standardní geometrii 0,5 litrových Marinelliho misek, ani 60 ml hliníkových misek válcových, kterážto metodika je v naší laboratoři zavedena.

Vzorky omítek byly proto měřeny v nízkopozadovém vysoce citlivém laboratorním anticompton-antikoincidenčním gama spektrometru SILAR se studnovým detektorem Leadmeter Na(Tl) 50x50 mm, umístěným ve studnovém ochranném NaI(Tl) detektoru o rozměrech 160x125 mm s prostorovým úhlem detekce  $4\pi$  a ochranným olověným stíněním o tloušťce 10 cm.

Měření proběhlo v geometrii malých 2 ml skleněných lahvíček. Byl zvolen komerčně dostupný typ značky Sigma-Aldrich (clear glass vial 12x32x6 mm, 2 ml, typ PK100) s uzávěrem (bez septa) z tvrdého černého polypropylenu s těsněním F217/PTFE (Obr. 10).



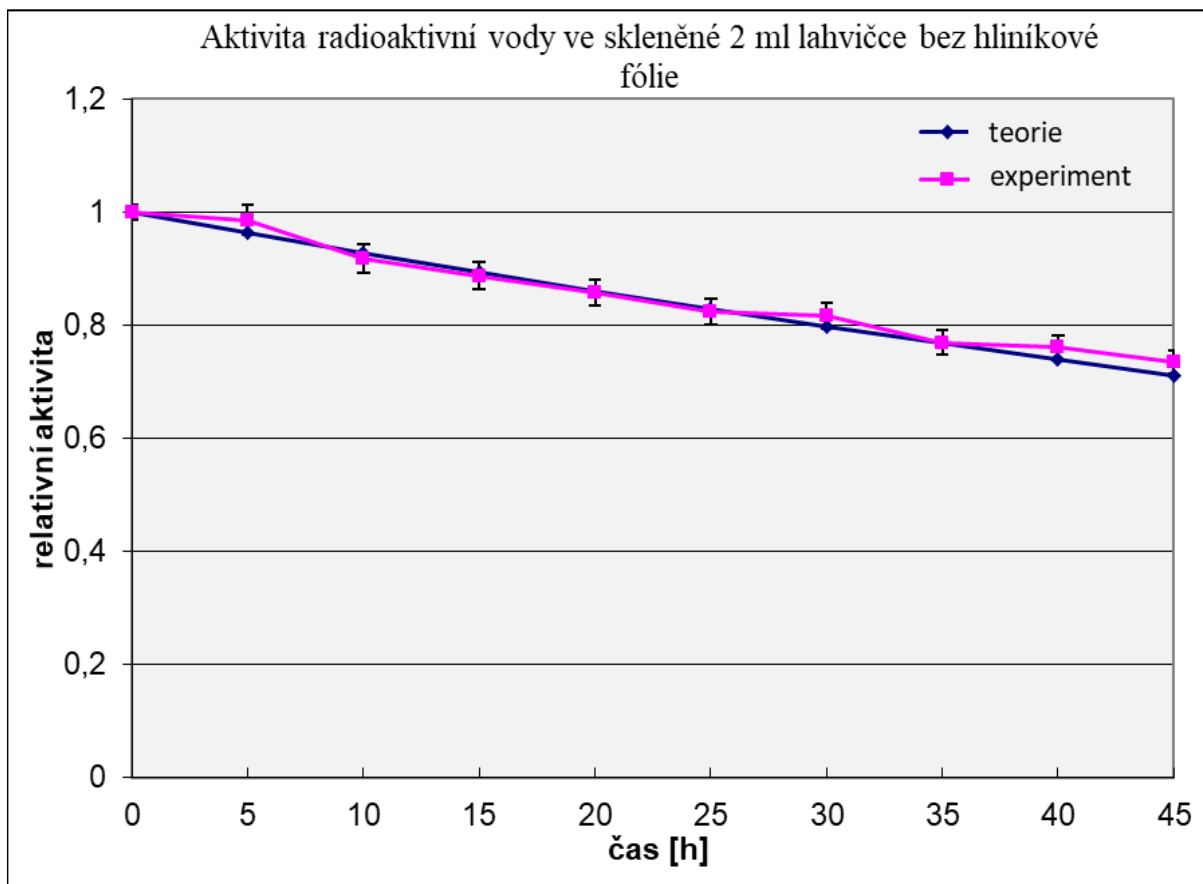
Obr. 10: 2 ml skleněné lahvičky použité pro stanovení  $^{226}\text{Ra}$  v pevných vzorcích. Foto M. Voháňková 2023.

### 5.2.1 Test těsnosti skleněných 2 ml lahviček

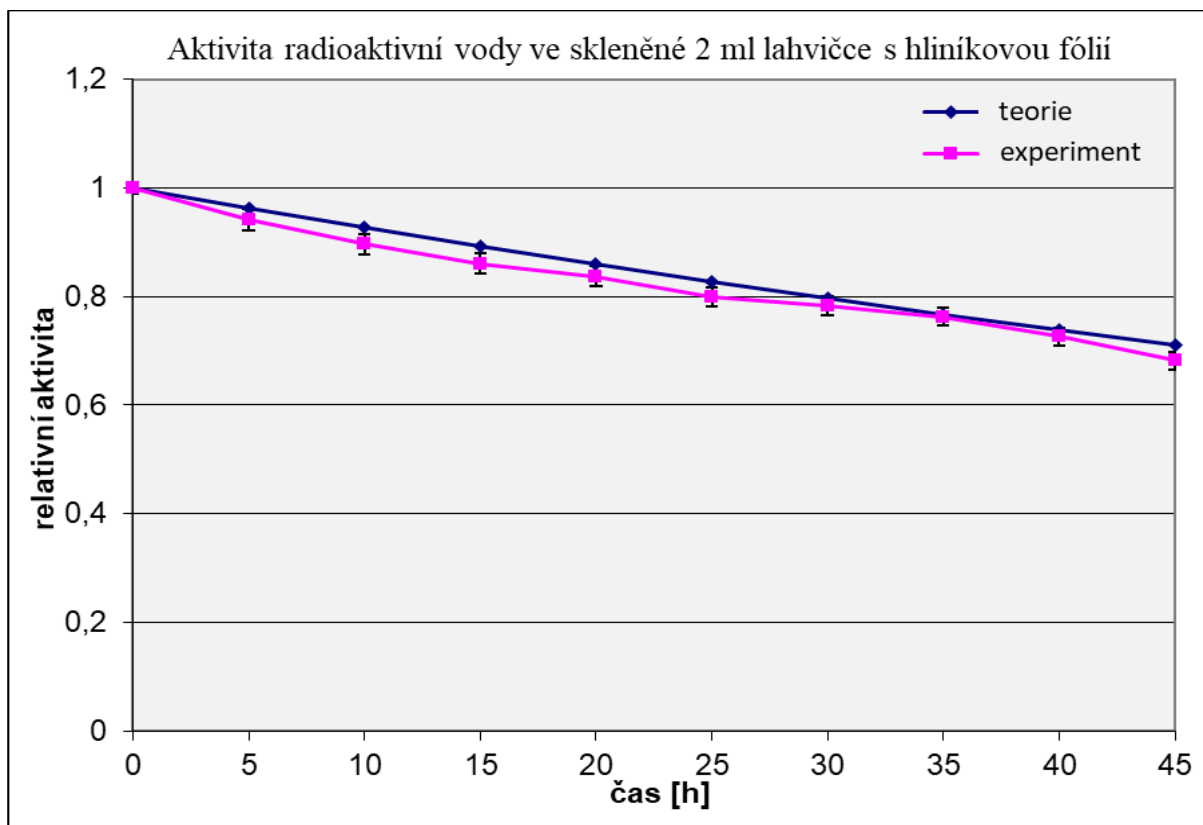
U skleněných lahviček bylo nejprve nutné zjistit, zda-li jsou těsné k úniku radonu, aby bylo možné spolehlivě měřit  $^{226}\text{Ra}$  na gama liniích produktů  $^{222}\text{Rn}$  a změřit i koeficient emanace. Jako problematické se jeví právě polypropylenové víčko (s F217/PTFE těsnicí vložkou), u kterého bylo provedeno testování jeho dalšího utěsnění. Jako možnost utěsnění byla zvolena hliníková fólie, běžně používaná v domácnosti. Z této fólie bylo vystřiženo malé kolečko o stejném průměru, jako je vnitřní průměr víčka lahvičky a s pomocí dřevěné tyčinky vtlačeno do dna víčka. Takto upravená lahvička byla testována na těsnost, stejně jako lahvička bez hliníkové fólie za použití radioaktivní vody z pramene Pod Skalou (<https://www.estudanky.eu/12362-pramen-pod-skalou>), jež má aktivitu okolo 8 kBq/l  $^{222}\text{Rn}$ , která byla do obou těchto lahviček naplněna. Voda byla odebrána necelých 48 hodin před měřením do skleněných láhví a převezena na Přírodovědeckou fakultu.

Kromě lahvičky s radioaktivní vodou bez hliníkové fólie a hliníkovou fólií utěsněnou lahvičkou s radioaktivní vodou byla testována ještě lahvička prázdná a lahvička naplněná cukrem. Obě lahvičky byly použity jako dvě varianty stanovení pozadí. Každá z lahviček (s vodou i pozadí) byla přeměřena v sekvenci 10 následujících měření, přičemž každé měření probíhalo 5 hodin.

Po kontrolních měření těchto čtyř lahviček bylo zjištěno, že křivky relativního poklesu aktivity radonu (signál na linii  $^{214}\text{Pb}$ , 352 keV) jsou v rámci nepřesnosti měření totožné s teoretickou křivkou rozpadu  $^{222}\text{Rn}$ . Lahvičky jsou tedy pro radon těsné a lahvička bez hliníkové fólie (Obr. 11) těsní stejně dobře jako lahvička s hliníkovou fólií (Obr. 12) a není tedy nutné lahvičku nijak dodatečně utěsňovat.



Obr. 11: Graf poklesu gama aktivity radonové vody ve skleněné 2 ml lahvičce bez hliníkové fólie.



Obr. 12: Graf poklesu gama aktivity radonové vody ve skleněné 2 ml lahvičce s hliníkovou fólií.

## 5.2.2 Měření vzorků omítek na gama spektrometru

Měření vzorků v lahvičkách probíhalo na gama spektrometru SILAR se studnovým detektorem Leadmeter s olověným stíněním o tloušťce 10 cm. Detektor byl obsluhován multikanálovým analyzátozem DSA 2000 (Canberra). Načítací časy byly zvoleny různě, dle aktivit jednotlivých vzorků. Popsaný gama spektrometr byl použit pro stanovení  $^{226}\text{Ra}$  na linii  $^{214}\text{Pb}$  (352 keV), jež je krátkodobým produktem rozpadu  $^{222}\text{Rn}$ . Kalibrace zesílení byla prováděna kalibračním zdrojem  $^{137}\text{Cs}$  po každém měření. K přepočtu naměřených hodnot na obsahy  $^{226}\text{Ra}$  byly použity standard BL-5 a jako referenční materiál standard BL-2 (Tab. 1). Ovládání spektrometru probíhalo v programu Genie 2000 a data dále zpracována v programu Microsoft Excel.

U standardů BL-2 i BL-5 (uranové rudy z ložiska Beaverlodge) byly od výrobce (CANMET) uvedeny obsahy uranu v % a obsahy  $^{226}\text{Ra}$  v pCi/g (BL-2) nebo v Bq/g (BL-5). Obsahy radia byly pro naše potřeby převedeny dle vztahu:  $1 \text{ pCi} = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Bq}$  a vyjádřena v % eU dle vztahu  $1 \text{ g U} = 12,35 \text{ kBq}$  (Tab. 1).

Tab. 1: Certifikované obsahy uranu a aktivity radia ve standardech BL-2 a BL-5 (Ignes a kol. 1977, Steger a kol. 1979) a aktivity radia přepočtené na % eU.

	U [%]	$^{226}\text{Ra}$ [pCi/g]	$^{226}\text{Ra}$ [Bq/g]	$^{226}\text{Ra}$ [% eU]
<b>BL-2</b>	0,453	1490	n.a.	0,446
<b>BL-5</b>	7,09	n.a.	857	6,94

Očištěná naplněná skleněná lahvička byla pro zabránění kontaminace detektoru vložena do vnější plastové lahvičky (LDPE) o průměru 2 cm, jejíž velikost se shoduje s vnitřním průměrem studnového detektoru spektrometru. Sestava dvou lahviček byla zabalena do mikrotenu a vložena do detektoru. Doba měření se lišila, v závislosti na aktivitě vzorku. V případě aktivnějších vzorků měření probíhalo 1000 sekund, u méně aktivních 3600 s, u jediného neaktivního vzorku až 180 000 sekund (vzorek č. OJ-9). Standard BL-5 a referenční materiál BL-2 byly změřeny až při měření emanovaných vzorků omítek po cca třech týdnech, kdy byla dosažena radioaktivní rovnováha mezi  $^{226}\text{Ra}$  a  $^{222}\text{Rn}$  a jeho krátkodobými rozpadovými produkty.

Nejistota stanovení (counting error) byla vypočtena na základě vztahu:  $\sigma = \sqrt{N}$ , kde N je počet impulzů. Aby bylo možné považovat výsledky za průkazné, měla by být naměřená hodnota počtu impulzů větší než  $2\sigma$ . Jednotlivé nejistoty se sčítají, v případech, kde nelze zanedbat pozadí platí vztah:  $\sigma = \sqrt{\sigma_{1+bkg}^2 + \sigma_{bkg}^2}$ , kde bkg je počet impulzů pozadí.

Aktivitu  $^{226}\text{Ra}$  lze vyjádřit dvěma způsoby, buď v Bq/kg nebo v ekvivalentech uranu (eU). Pro účely porovnání aktivit  $^{226}\text{Ra}$  ve vzorcích měřených gama spektrometricky obsahy uranu analyzovanými INAA bylo zvoleno vyjádření aktivity  $^{226}\text{Ra}$  v % eU. Ve stavu radioaktivní rovnováhy bude 1% U odpovídat 1% eU  $^{226}\text{Ra}$ . Citlivost byla stanovena měřením standardu BL-5, jež byl změřen 3krát, pro dostatečnou přesnost při výpočtu. Ze tří měření standardu BL-5 byla vypočtena průměrná hodnota počtu impulzů. Na základě známého obsahu eU  $^{226}\text{Ra}$  ve standardu byla spočtena citlivost aparatury, která činila 7,67 imp/s/g/%eU.

Standard BL-2 byl použit jako referenční materiál. V porovnání s doporučenou hodnotou 0,45 % eU  $^{226}\text{Ra}$  bylo stanoveno  $0,48 \pm 0,01$  % eU  $^{226}\text{Ra}$ , což je uspokojivá shoda. Pro výpočet hodnoty pozadí byl použit průměr z deseti měření pozadí (sekvence 10 x 5 hodin), jež byla naměřena během testu těsnosti skleněných lahvíček.

Obsahy  $^{226}\text{Ra}$  (% eU) ve vzorcích byly stanoveny ze vzorků měřených těsně po hermetizaci skleněné lahvičky a tři týdny po hermetizaci (uzavření), kdy už došlo k nastolení radioaktivní rovnováhy mezi  $^{226}\text{Ra}$  a  $^{222}\text{Rn}$ . Po obou sériích měření byl na základě aktivity  $^{226}\text{Ra}$  ve vzorcích při prvním a druhém měření zjištěn koeficient emanace. Při prvním měření těsně po hermetizaci skleněných lahvíček byl zjištěn radon vázaný, po ustálení radioaktivní rovnováhy radon celkový. Odečtením těchto dvou hodnot byl zjištěn radon volný. Podílem radonu volného a celkového získáme koeficient emanace  $K_{em}$  (%).

### **5.3 Instrumentální neutronová aktivační analýza: INAA**

Použitím instrumentální neutronové aktivační analýzy (INAA) je možno stanovit kvantitativní i kvalitativní zastoupení vybraných prvků ve zkoumaném vzorku. Pro stanovení uranu ve vzorcích byla tato metoda zvolena jakožto nezávislá radioanalytická metoda, neboť gama spektrometrie v případě obsahu radia vyšším, než je obsah uranu, neposkytuje spolehlivé výsledky.

Metoda funguje na principu umělého navýšení počtu neutronů v atomu  $^{238}\text{U}$  vlivem vložení vzorku do pole neutronů indukovaných jaderným reaktorem. Tímto procesem dojde v atomovém jádře k přebytku neutronů a vzniku radionuklidu ( $^{239}\text{Np}$ ). Tento atom je umělým aktivačním produktem, jež má své měřitelné linie.

#### **5.3.1 Instrumentální neutronová aktivační analýza**

Vzorky byly analyzovány Ing. Jiřím Mizerou, Ph.D. na pracovišti ÚJV Řež na výzkumném reaktoru LVR-15, kde byly vzorky ozařovány dlouhodobě v takzvaném „off-line“ režimu.

Aktivita ozařovaných vzorků byla porovnávána se standardy Vz-1/1n, Vz-Va11, RM-GS-N a RM-W1. Pro stanovení uranu byly využity linie jeho aktivačního produktu  $^{239}\text{Np}$  o energiích 106,1 a 277,6 keV. Koncentrace uranu z těchto dvou měření byla zprůměrována a vyjádřena v procentech. Uváděná směrodatná odchylka je rozdílem hodnot obsahu uranu na obou analytických čarách.

#### **5.4 Makrofotografie omítek**

Snímky byly pořízeny na stereoskopické binokulární lupě Zeiss Stemi 305 Axiocam 208 color RNDr. Markem Tuhým, PhD. v laboratoři ÚGMNZ (PřF UK).

#### **5.5 Prášková rentgenová difrakce**

Na všech vzorcích byla provedena analýza minerálního složení na přístroji X'Pert PRO (PANalytical) s měděnou rentgenovou lampou v rentgenové laboratoři ÚGMNZ (PřF UK). Difrakční záznamy byly měřeny v úhlovém rozpětí  $3-60^\circ 2\theta$  s krokem měření 0,05 a s časem měření 200 s na jeden krok.

Vyhodnocení difrakčních záznamů proběhlo v programu X'Pert Highscore (PANalytical) v porovnání s databází PDF-2 (ICDD). Výsledné krystalické fáze byly zavedeny do tabulky sestupně, dle procentuálního zastoupení jednotlivých fází na hlavní (>25 %), vedlejší (5-25 %) a minoritní (>5 %).

#### **5.6 Elektronová mikroskopie a mikroanalýza**

Vzorky byly studovány na skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM) TESCAN Vega na pracovišti ÚPSG (PřF UK). Byly využity detektory sekundárních elektronů a zpětně odražených elektronů a systém energiově disperzní spektrometrie (EDS). Analýzu provedl Mgr. Martin Racek, Ph.D.

## 6 Výsledky

### 6.1 Terénní radiometrická túra

Při radiometrických túrách ve dnech 25.2.2022, 25.3.2022 a 25.4.2022. bylo nalezeno celkem 11 domů se zvýšenou aktivitou záření gama (Tab. 2, Obr. 13).

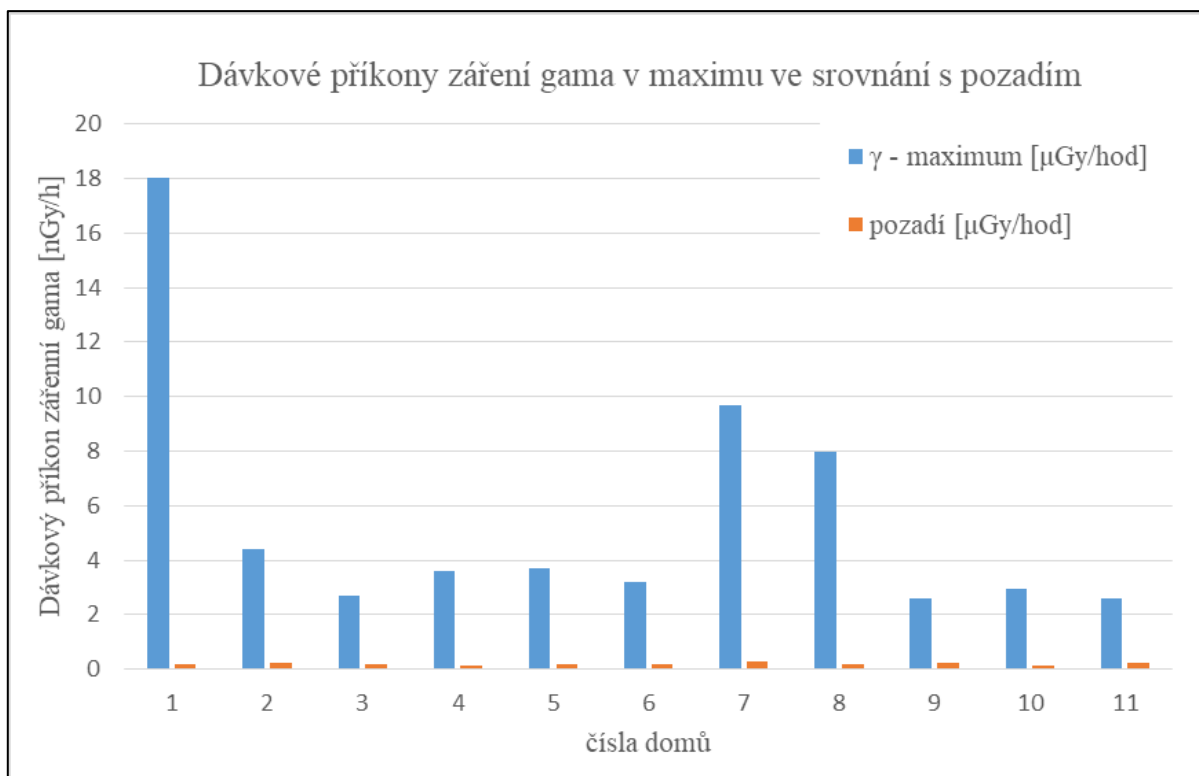
Vzhledem k citlivosti problematiky jsme se s mým školitelem rozhodli k nezveřejnění konkrétních adres. Jedinou odtajněnou budovou je Královská mincovna Jáchymov, jež vystupuje jako dům č. 6 (Obr. 14 a 15).

Dávkový příkon záření gama při kontaktu se zdí se pohyboval od 2,6 do 18  $\mu\text{Gy/h}$  a přirozené pozadí od 0,12 do 0,30  $\mu\text{Gy/h}$ . Nejvyšších hodnot dosahoval dům č. 1 a nejnižších hodnot domy č. 9 a 11.

Tab. 2: Výsledky radiometrické túry a naměřené dávkové příkony záření gama v maximum ve srovnání s přirozeným pozadím radiometrem RP 103.

<b>dům č.</b>	<b>datum nálezu</b>	<b><math>\gamma</math> - maximum [<math>\mu\text{Gy/h}</math>]</b>	<b>pozadí [<math>\mu\text{Gy/h}</math>]</b>
<b>1</b>	25.02.2022	18,0	0,18
<b>2</b>	25.02.2022	4,4	0,24
<b>3</b>	25.02.2022	2,7	0,20
<b>4</b>	25.02.2022	3,6	0,13
<b>5</b>	25.03.2022	3,7	0,21
<b>6</b>	25.03.2022	3,2	0,19
<b>7</b>	25.03.2022	9,7	0,30
<b>8</b>	25.03.2022	8,0	0,18
<b>9</b>	25.04.2022	2,6	0,23
<b>10</b>	25.04.2022	3,0	0,12
<b>11</b>	25.04.2022	2,6	0,24

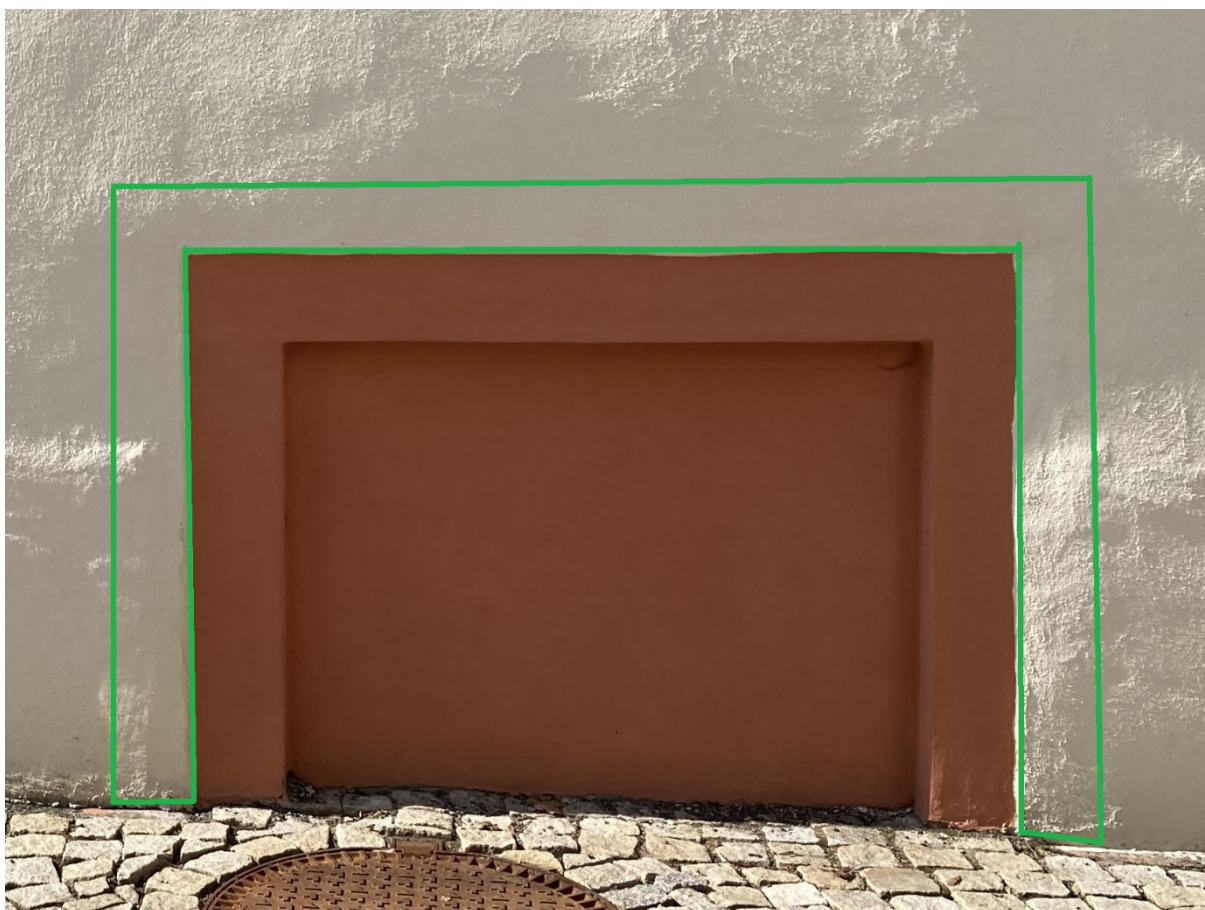




Obr. 13: Sloupcový Graf dávkových příkonů záření gama v maximum ve srovnání s přirozeným pozadím.



Obr. 14: Královská mincovna Jáchymov, záběr z ulice Mincovní. Foto M. Voháňková, 2022.



Obr. 15: Detailní záběr na oblast zvýšených dávkových příkonů záření gama na budově Královské mincovny (muzeum) a hlavní oblast zdroje záření, která tvoří souvislý pás okolo červeně zbarveného sklepního okna; vyznačeno zeleným obrysem. Foto M. Voháňková, 2022.

## 6.2 Terénní gama spektrometrie

Po vyhledání maxima byly hodnoty změřeny a zaznamenány v kontaktu se zdí, jeden metr od zdi a v pozadí, ve vzdálené pozici více metrů od domu. Každé měření terénním gama spektrometrem probíhalo jednu minutu (Tab. 3).

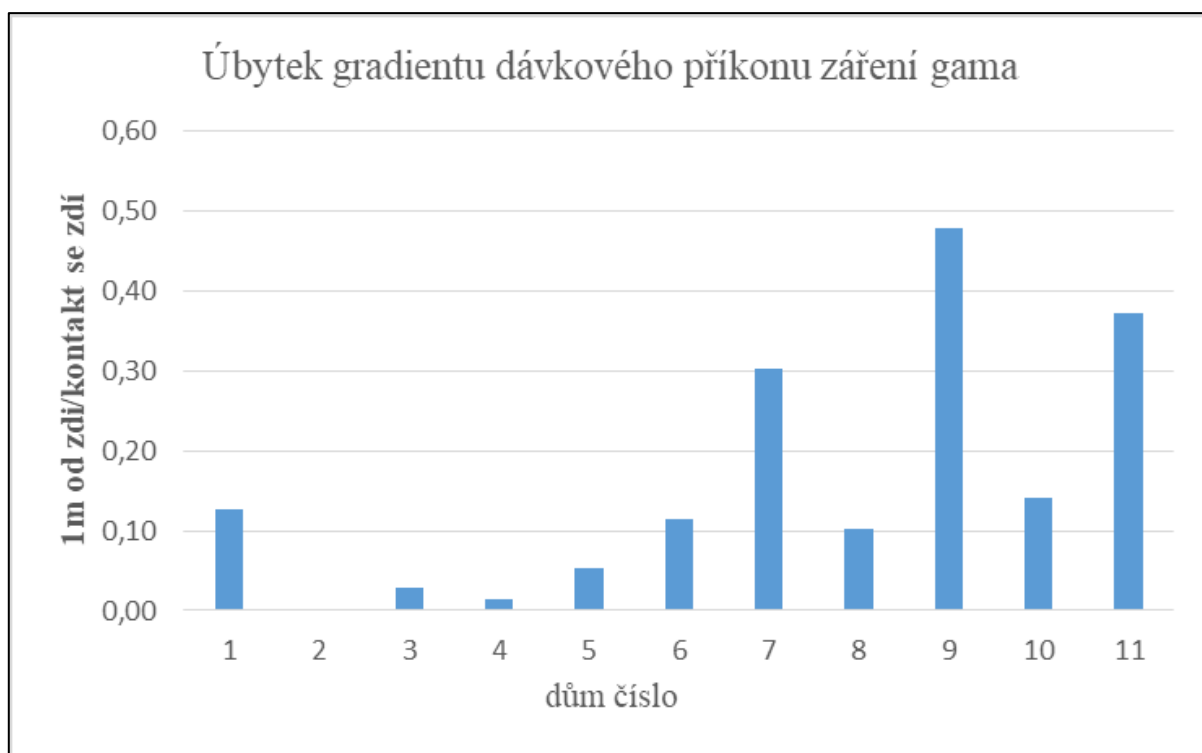
Dávkové příkony záření gama se v kontaktu se zdí pohybovaly v rozmezí 3,2 až 28,4  $\mu\text{Gy/h}$ . Nejnižších hodnoty vykazoval dům č. 9 a nejvyšší hodnoty byly zjištěny u domu č. 1. Dávkové příkony gama jeden metr od zdi byly 0,15 až 3,7  $\mu\text{Gy/h}$ , přičemž nejnižší hodnoty byly naměřeny u domu č. 4 a nejvyšší u domu č. 1. Pozadí se pohybovalo mezi hodnotami 0,068 a 0,345  $\mu\text{Gy/h}$ .

Tab. 3: Výsledky terénní gama spektrometrie na domech v Jáchymově (kontakt, 1 m, pozadí, poměry).

dům.č	kontakt se zdi [μGy/h]	1 m od zdi [μGy/h]	pozadí [μGy/h]	1m od zdi/kontakt se zdi
1	28,4	3,74	0,154	0,13
2	Kameny ve zdi (heterogenní pole gama)			
3	6,86	0,316	0,119	0,03
4	4,60	0,149	0,0844	0,01
5	7,58	0,509	0,118	0,05
6	6,50	0,852	0,125	0,11
7	8,93	2,95	0,345	0,30
8	4,30	0,550	0,127	0,10
9	3,20	1,60	0,130	0,48
10	4,29	0,660	0,068	0,14
11	4,30	1,81	0,334	0,37

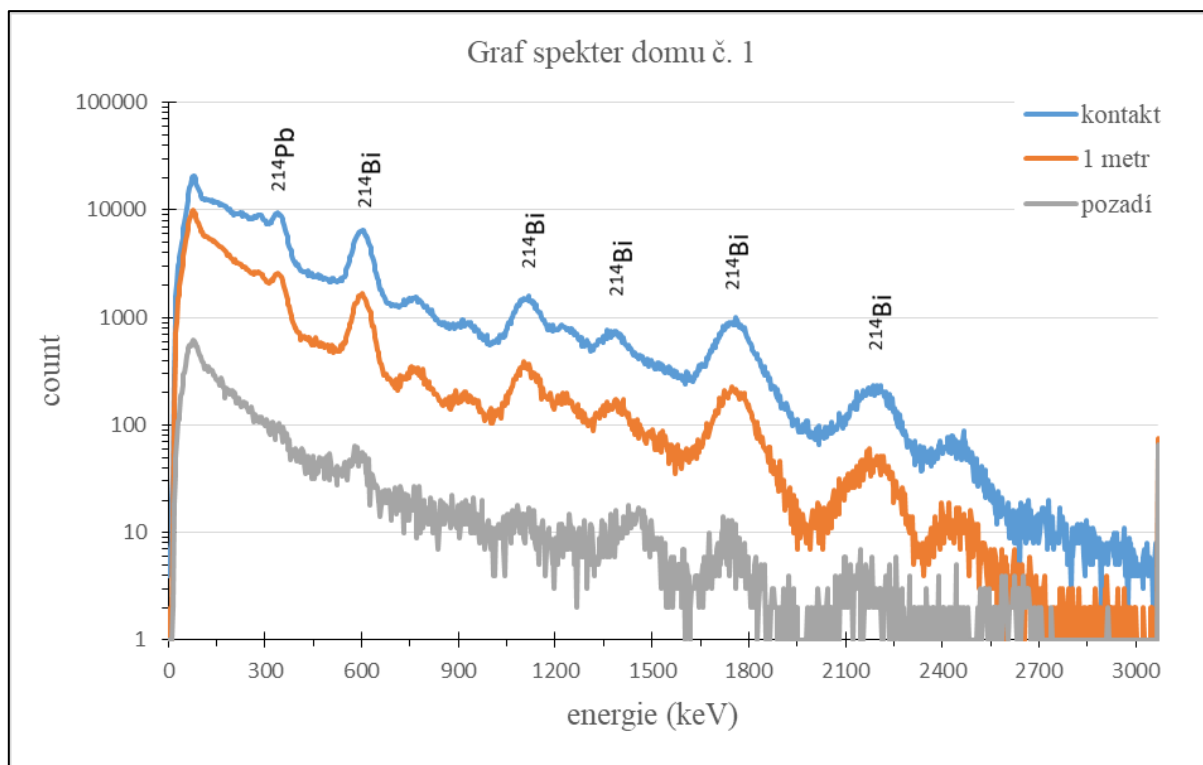
V případě domu č. 2 bylo při podrobném měření zjištěno, že pole záření gama je velice heterogenní (několik bodových maxim s velkými gradienty) a jeho zvýšení je způsobeno nejspíše přítomností zazděných aktivních kamenů. Dále proto tento dům nebyl zkoumán, ani gama spektrometricky hodnocen.

Sloupec „1 m od zdi/ kontakt se zdi“ je podílem těchto hodnot po odečtení pozadí, které zejména pro hodnotu 1 m od zdi v některých případech tvoří již významnou část. Tento poměr pak můžeme nazvat jako gradient úbytku dávkového příkonu záření gama. Čím větší podíl je, tím více je anomálie plošně rozlehlá (Obr. 16). V teoretickém případě nekonečně rozlehlé zdi by tento poměr byl blízký 1. Nejvyšší poměr dávkového příkonu záření gama jeden metr od zdi a v kontaktu se zdi byl zjištěn u domu č. 9, kde anomální úsek tvořil několik metrů čtverečních rozlehlou plochu, zatímco nejmenší pošná rozlehlost byla u domu č. 3, kde se aktivní malta vyskytovala pouze jako lokální relikt ve spárách mezi kameny na části domovní zdi a u domu č. 4, kde byla radiometrická anomálie téměř bodová. Tato anomálie je však v těsném kontaktu s ocelovým zábradlím, které velmi znesnadňovalo její bližší vyšetření. Je tak možné, že i zde to je pouze zazděný aktivní kámen.



Obr. 16: Sloupcový graf gradientu úbytku dávkového příkonu záření gama na měřených domech v Jáchymově.

Kvalitativní detekce charakteru záření gama spektrometrií vykazala na anomálních úsecích zdí ve všech případech jednoznačnou převahu radionuklidů uranové řady, tedy ekvivalentu uranu, což je dobře patrné na stažených přístrojových spektrech (Obr. 17). Zvýšené dávkové příkony záření gama způsobuje izotop  $^{214}\text{Bi}$ , v nízkých energiích je patrné i energetické maximum  $^{214}\text{Pb}$ . Oba jsou krátkodobými produkty rozpadu  $^{222}\text{Rn}$ . Ve spektru pozadí jsou patrná i maxima  $^{40}\text{K}$  (radioaktivní izotop draslíku s energií 1460 keV) a  $^{208}\text{Tl}$  z rozpadové řady thoria na energii 2,6 MeV.



Obr. 17: Energetická spektra záření gama naměřená na domu č. 1 (kontakt se zdi, 1 metr od zdi a pozadí) a popis hlavních maxim ( $^{214}\text{Bi}$  a  $^{214}\text{Pb}$ ).

### 6.3 Laboratorní gama spektrometrie

Na laboratorním gama spektrometru SILAR byly měřeny aktivity  $^{226}\text{Ra}$  v celkem dvanácti vzorcích. Z domu č. 1 byl měřen vzorek OJ-1, představující drobný materiál oškrábaný z málo soudržného vrtného jádra a vzorek strusky OJ-14, separovaný z poblíž nezávisle odebrané omítkové drti. Z domu č. 3 byly měřeny vzorky malty vyškrábané ze spár mezi rulovými kameny OJ-2 (jemnější typ), OJ-3 (hrubší typ), které lze považovat za duplikáty téhož materiálu a separovaná struska OJ-13 z hrubšího vzorku OJ-3; samotná (mladší) omítka domu č. 3 zvýšenou aktivitu nevykazovala. Z domu číslo 5 bylo získané vrtné jádro natolik soudržné, že nebylo snadno možné mechanicky větší objem oddělit. Proto byl v tomto případě měřen vzorek vrtné moučky OJ-4. Kromě slabé povrchové vrstvy štku však profil jádra cca 3 cm mocné omítky vypadá homogenně a tedy vrtná moučka celkem dobře reprezentuje obsahy radionuklidů v omítce domu č. 5. V případě domu č. 7 se odvrtné jádro ukázalo neaktivní (Obr. 9). Proto byly z domu č. 7 odebrány a měřeny „záteky“ (zbytky) staré aktivní omítky mezi červenými cihlami ze dvou míst, z méně aktivního (OJ-5) a aktivnějšího místa (OJ-6). (Dům č. 7 byl dle charakteru aktivních partií nejspíše sanován v 90. letech, kdy byla omítka z velké části lícové zdi oklepána a rozptýlena částečně i do vzdálenějšího prostoru před domem, kde je nyní relativně vysoké „pozadí“ v širším odpočinkovém místě s lavičkou).

V případě domu č. 8 tvořila aktivní, velmi soudržná omítka nejstarší vrstvu, krytou mladší neaktivní, ne až tak pevnou omítkou, nejméně tří až čtyřnásobné mocnosti, na velkých plochách odpadlou. Bylo tak možno vzorkovat i kusy staré aktivní omítky, ty však nebylo pro vysokou pevnost možno snadno fragmentovat. Od strojního drcení bylo raději upuštěno pro zřejmý charakter materiálu. Na zachovalém místě zdi domu č. 8 byl realizován jádrový odběr přes obě vrstvy omítky až ke kamenné zdi. Byl proto měřen vzorek vrtné moučky OJ-7, představující ovšem směs obou omítek, s převládajícím neaktivním materiálem. Vzorek rozsypavé malty z navážky NAV byl měřen v duplikátu OJ-10 a OJ-11, představujícím nabraný jemný sypký materiál ze dvou míst z téhož sáčku. Jako porovnávací byl změřen vzorek OJ-9 neaktivní omítky z domu č. 10.

Obsahy  $^{226}\text{Ra}$  [% eU] se u vzorků pohybovaly v rozmezí 0,123 až 5,28 (Tab. 4). Vlastní neovlivněné omítky mají hmotnostní aktivity v rozmezí 2,29 (OJ-2) až 4,45 (OJ-10) % eU ( $^{226}\text{Ra}$ ), kromě odchylného vzorku z domu č. 5 (OJ-4), který obsahuje pouze 0,33 % eU ( $^{226}\text{Ra}$ ). Naředění a ovlivnění neaktivním materiálem je jasně zřejmé u vzorku OJ-7 z domu č. 8, který vykázal relativně nejnižší aktivitu 0,12 % eU ( $^{226}\text{Ra}$ ). Výjimkou byl neaktivní vzorek omítky OJ-9 (dům č. 10), u něhož byla naměřena aktivita  $^{226}\text{Ra}$  pouze 5,8 ppm eU, což je požadovaná hodnota. Stejně hodnoty lze očekávat u běžných omítek.

Nejvyšší aktivity radia byly stanoveny ve dvou vzorcích separovaných strusek OJ-13 a OJ-14, a to 3,42 a 5,28 % eU, jež jsou v obou případech podstatně vyšší než aktivity radia ve zdrojových omítkách. Strusky jsou tedy hlavním nositelem radia ve studovaných omítkách OJ-1 a OJ-3.

Aktivity  $^{226}\text{Ra}$  u duplikátů vzorků z domu č. 3 (OJ-2 a OJ-3) jsou 2,29 a 2,49 % eU. U vzorků navážky (NAV) jsou 4,46 % eU u vzorku OJ-10 a 4,33 % eU u vzorku OJ-11. Stanovené aktivity  $^{226}\text{Ra}$  jsou u obou duplikátně měřených vzorků podobné. Podobnost stanovených hodnot u duplikátů potvrzuje správnost zvoleného metodického přístupu, kdy měřený (ač relativně malý) objem vzorku dobře charakterizuje aktivitu celého odebraného vzorku.

#### **6.4 Instrumentální neutronová aktivační analýza**

Obsahy U ve vzorcích se pohybovaly v rozmezí 0,05 až 1,67 % U, přičemž nejnižších hodnot dosahoval vzorek OJ-7 (směsný vzorek omítky z domu č. 8) a nejvyšších hodnot vzorek OJ-13 (separovaná struska z domu č. 3). Vlastní neovlivněné omítky pak v rozmezí 0,33 až 0,52 % U. Tedy i v případě uranu se ukazuje struska jako jeho hlavní nositel (Tab. 4).

Duplikáty OJ-2 a OJ-3 vycházejí podobně, 0,36 a 0,38 % U, duplikáty OJ-10 a OJ-11 však poněkud rozdílněji, 0,52 a 0,46 % U, což reflektuje vyšší riziko homogenity pro velmi nízké navážky (100 mg) pro stanovené INAA, přestože vzorek byl jemněji třený, než pro stanovení radia laboratorní gama spektrometrií.

### 6.5 Porovnání laboratorní gama spektrometrie a INAA, koeficient radioaktivní rovnováhy a koeficient emanace

Hodnoty U [%] byly porovnány s hodnotami  $^{226}\text{Ra}$  [% eU] a byl spočten koeficient radioaktivní rovnováhy ( $K_{rr}$ ) Ra/U (Tab. 4). V případě stavu radioaktivní rovnováhy mezi radiem a uranem by poměr byl 100 %. U analyzovaných vzorků se  $K_{rr}$  pohyboval v rozmezí 205 – 941 %. Obsahy radia jsou vždy vyšší, či podstatně vyšší, než obsahy uranu. Výjimkou je vzorek OJ-4 (dům č. 5), v blízkosti stavu radioaktivní rovnováhy (94±4 %). Tento výsledek poukazuje na fakt, že se omítka z domu č. 5 charakterově liší od ostatních odebraných vzorků. Nejvyššího poměru Ra/U dosáhl vzorek OJ-11 a to 941±46 % (vzorek NAV, odebraný z navážky nalezené poblíž náměstí), který má obsah ekvivalentního uranu (radia) takřka 10krát vyšší, než obsah uranu.

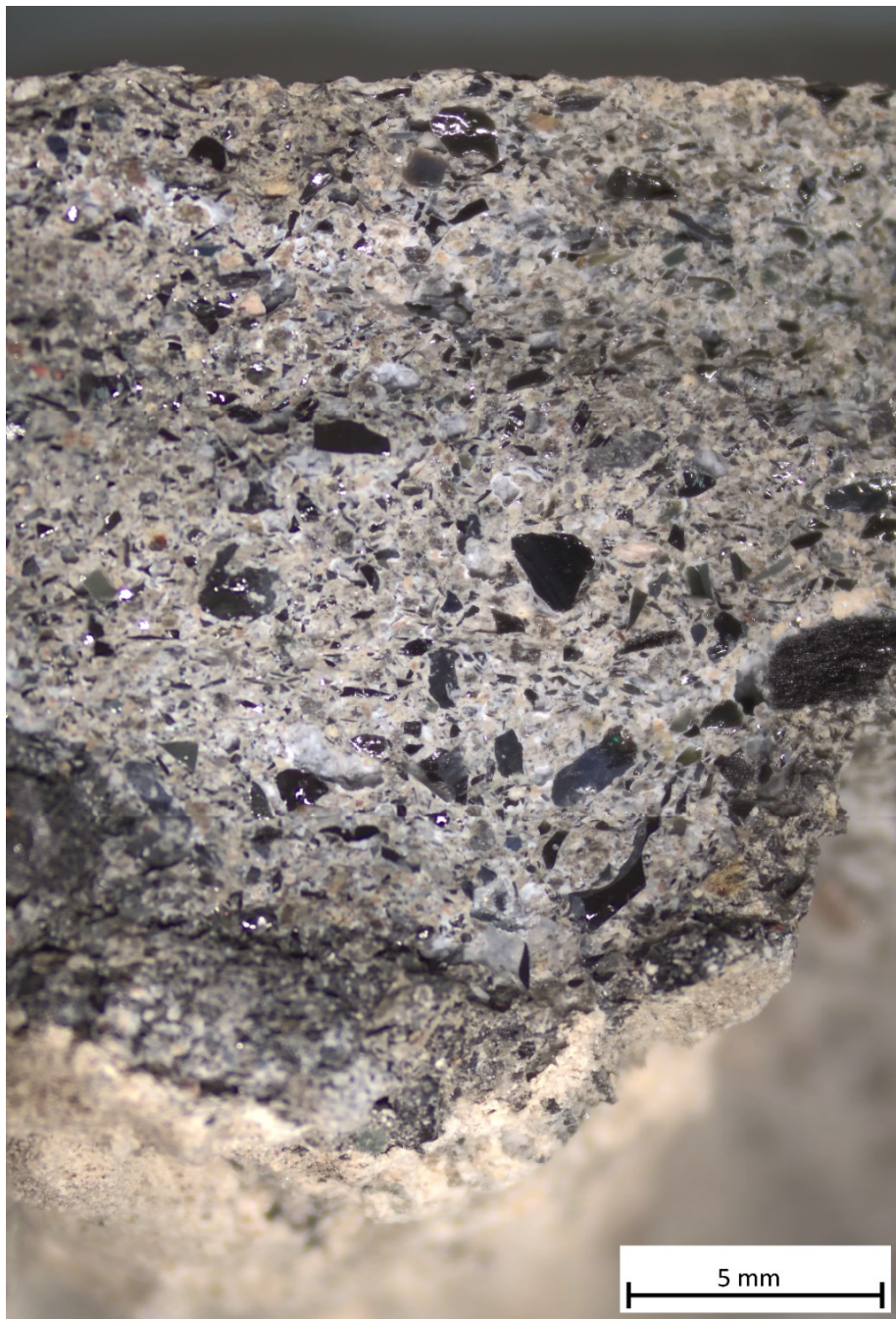
Tab. 4: Porovnání výsledků laboratorní gama spektrometrie a INAA, koeficienty radioaktivní rovnováhy a koeficienty emanace.

dům č.	lab.č.	gama spektrometrie		INAA		$K_{rr}$		$K_{em}$
		$^{226}\text{Ra}$	sigma	U	sigma	Ra/U	sigma	
		[% eU]	[% eU]	[%U]	[% U]	[%]	[%]	[%]
<b>1</b>	OJ-1	2,72	0,01	0,33	0,02	829	67	< 0,5
<b>1 (struska)</b>	OJ-14	5,28	0,02	n.a.		n.a.		0,7
<b>3</b>	OJ-2	2,29	0,01	0,36	0,02	638	42	< 0,5
<b>3 (duplikát)</b>	OJ-3	2,48	0,01	0,38	0,02	649	44	3,9
<b>3 (struska)</b>	OJ-13	3,42	0,01	1,67	0,10	205	14	< 0,5
<b>5</b>	OJ-4	0,33	0,01	0,35	0,01	94	4	7,5
<b>7</b>	OJ-5	2,44	0,02	0,34	0,01	709	36	< 0,5
<b>7</b>	OJ-6	3,57	0,02	0,493	0,001	724	1	< 0,5
<b>8</b>	OJ-7	0,12	0,00	0,047	0,001	260	16	< 0,5
<b>10</b>	OJ-9	0,00058	0,00004	n.a.		n.a.		n.a.
<b>NAV</b>	OJ-10	4,45	0,02	0,518	0,002	860	7	< 0,5
<b>NAV (duplikát)</b>	OJ-11	4,33	0,02	0,46	0,02	941	46	1,2



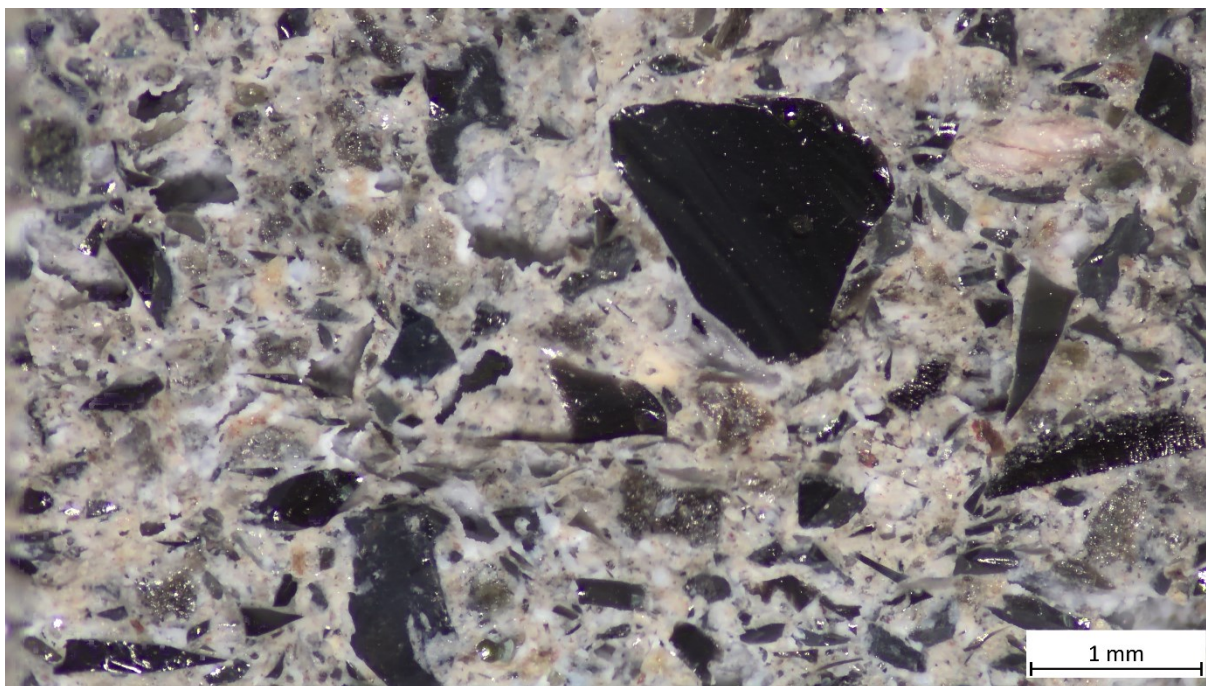
## 6.7 Makroskopický popis omítek

Na snímcích z binokulární lupy jsou dobře viditelné tmavé strusky různých tvarů i velikostí, dosahující rozměrů až 2x1,5 mm. Strusky tvoří ostrohranná zrna odstínů šedé barvy, s bublinkami, v některých případech s viditelnou fluidální texturou. Omítka obsahuje strusky velké množství, odhadem kolem 30 - 40 %, někdy i více. Struska v omítce vystupuje jako plnivo, respektive ostrohranné ostřívo. Bílá zrna křemene a narůžovělé živce jsou menší než úlomky strusky. Kalcit, sádrovec a další minerály tvoří jemnozrnnou matrix s velmi jemnými krystaly do prostoru volných dutin (Obr. 18 a 19).



Obr. 18: Foto omítky obsahující strusku pořízené binokulární lupou (dům č. 8). Nahoře lícová strana omítky, dole kontakt se zdívkou se „zátekem“ malty mezi kameny. Foto Marek Tuhý 2023.





Obr. 19: Detailní záběr na omítku z foto Obr. 18. Ve strusce je viditelná fluidální textura a bublinka. Foto Marek Tuhý 2023.

## 6.6 Prášková rentgenová difrakce

Z výsledků práškové rentgenové difrakce vyplývá, že hlavními složkami omítek je křemen s kalcitem. Z vedlejších minerálů se v omítkách nejčastěji vyskytují živce, kaolinit a muskovit. Minoritní fáze jsou nejčastěji zastoupeny sádrovcem a cristobalitem (Tab. 5). Na všech záznamech, kromě omítky z domu č. 5 byl viditelný výrazný obsah amorfni fáze („hrb“ zvýšení pozadí v širokém rozpětí difrakčních úhlů), což lze vysvětlit přítomností strusky ve vzorcích.

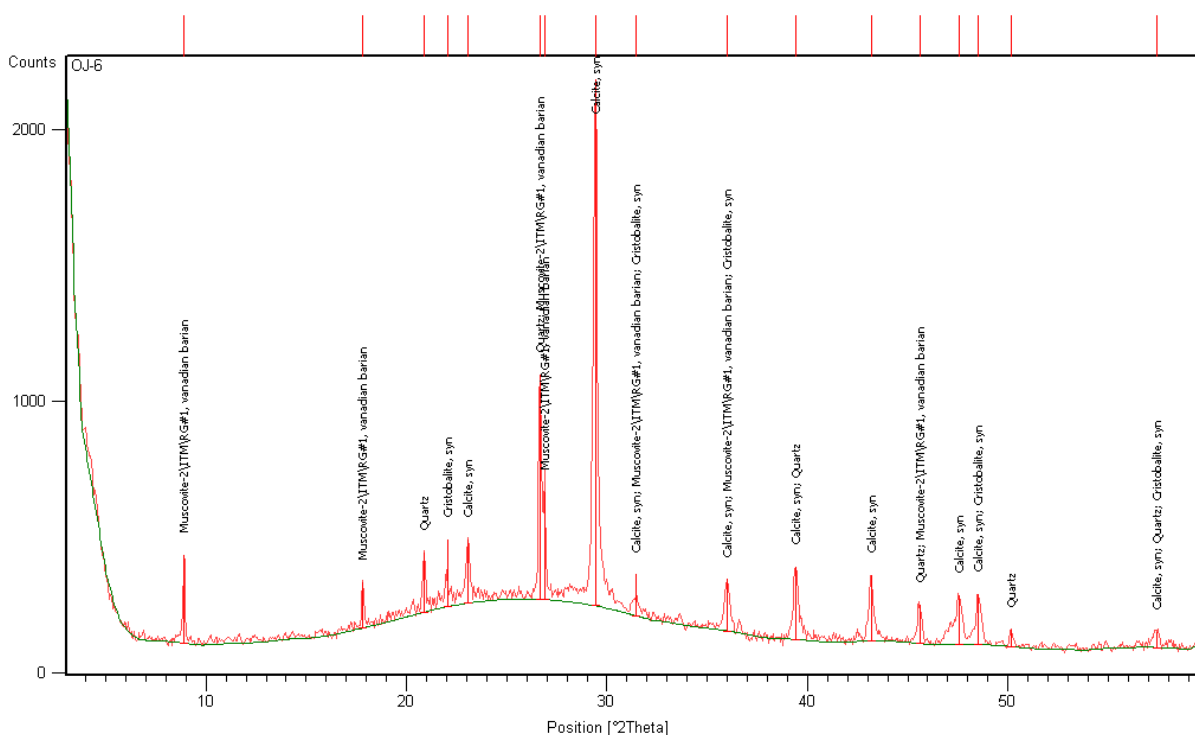
Strusky jsou složeny převážně z amorfni fáze, minoritní zastoupení v obsahu má troilit (FeS), cristobalit (vysokoteplotní modifikace  $\text{SiO}_2$ ) a v případě strusky z domu č. 1 i uraninit s.s. ( $\text{UO}_2$ ) a baryt. Přítomnost troilitu potvrzuje i nález sulfidických kuliček pod elektronovým mikroskopem. Přítomnost cristobalitu (vysokoteplotní formy  $\text{SiO}_2$ ) dokládá, že materiál byl zpracováván za vysokých teplot nad  $1025\text{ }^\circ\text{C}$ , při tomto procesu nejspíše došlo i ke vzniku strusky.

Vzorek OJ-4 (dům č. 5) je typově odlišný od ostatních omítek. Složení hlavních krystalických komponent je totožné, chybí však amorfni fáze, neboť neobsahuje strusku. Nejistá je drobná příměs uranofánu (vápenatý silikát uranylu).

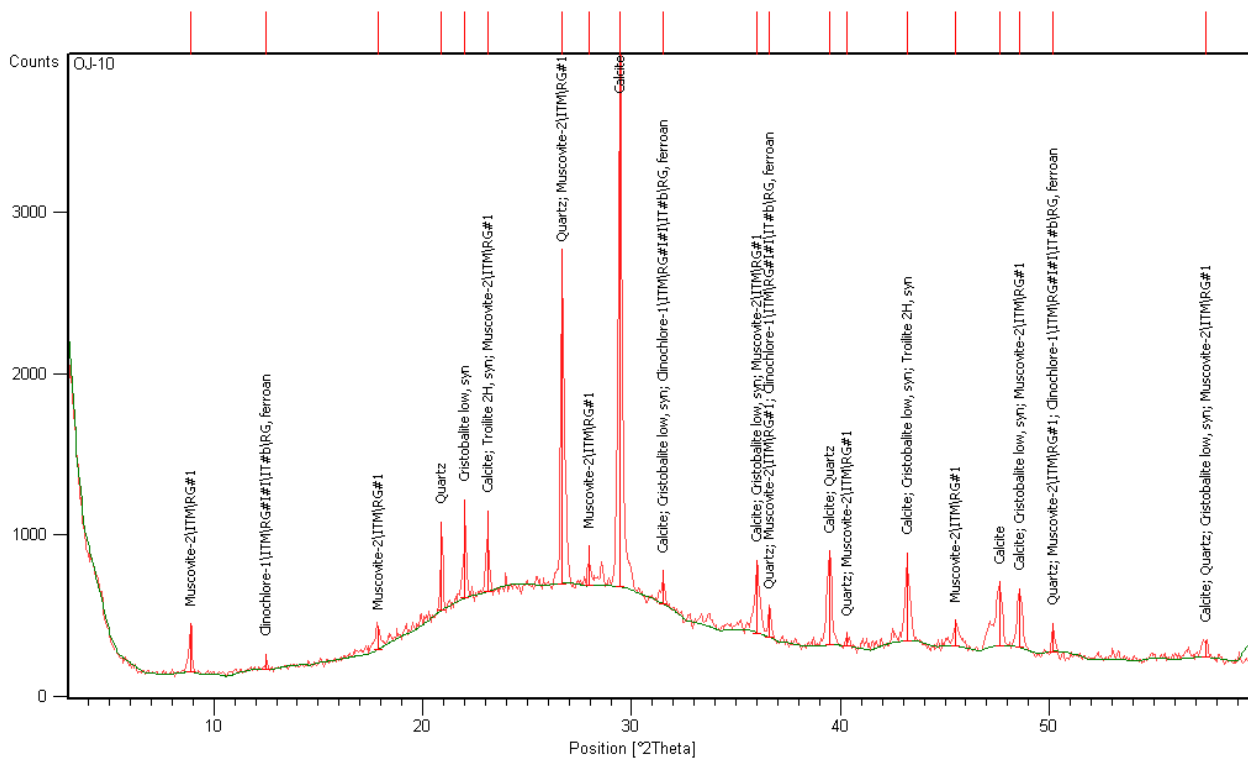
Ve vzorcích OJ-10 a OJ-11 byl RTG difrakcí zjištěn troilit a cristobalit, což poukazuje na vysoký podíl strusky.

Tab. 5: Výsledky práškové RTG difrakce s rozlišením hlavních, vedlejších a minoritních fází obsažených ve vzorcích omítek a separovaných strusek.

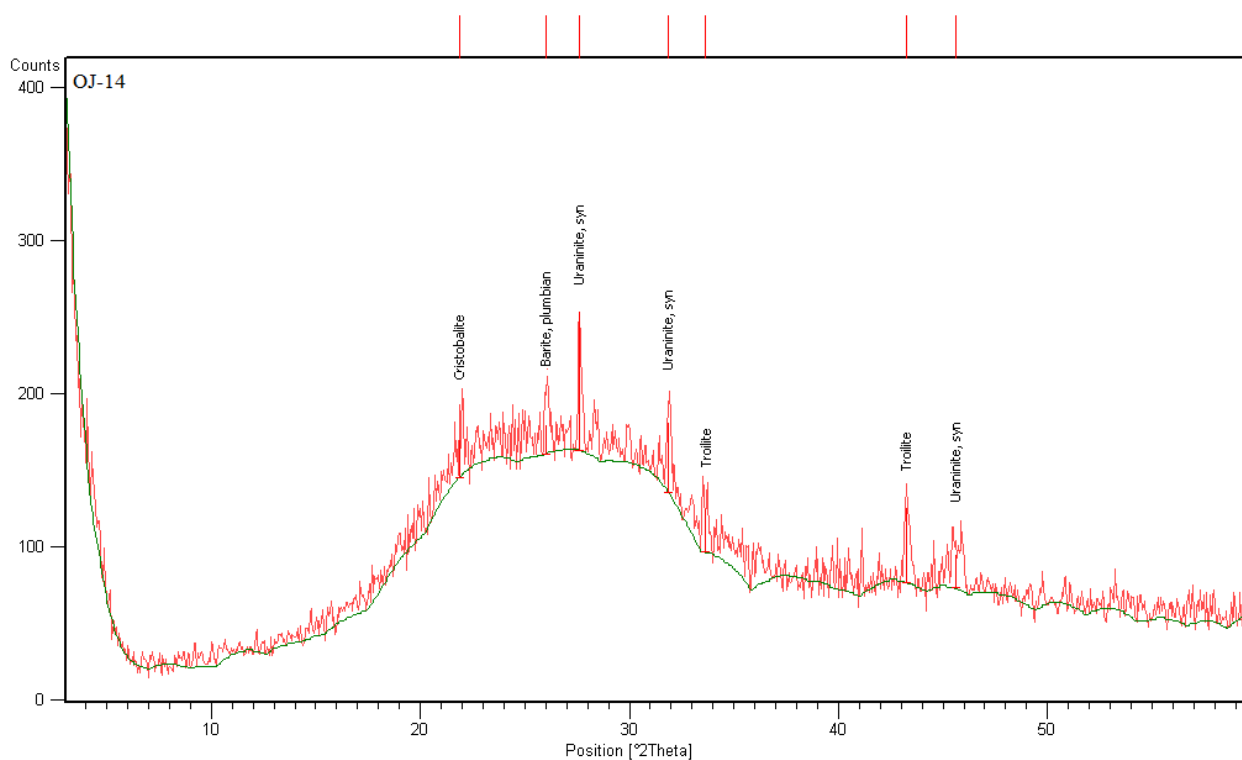
dům číslo.	Vzorek	hlavní fáze	vedlejší fáze	minoritní
1	OJ-1	amorfní fáze křemen, kalcit	albit, kaolinit	muskovit, sádrovec
<b>struska z domu č. 1</b>	OJ-14	amorfní fáze	-	troilit, uraninit, cristobalit, baryt
3	OJ-2	amorfní fáze, křemen	kalcit, kaolinit, albit, diopsid	muskovit, sádrovec
3	OJ-3	amorfní fáze, křemen, kalcit, illit	diopsid	sádrovec, kaolinit, klinochlor
<b>struska z domu č. 3</b>	OJ-13	amorfní fáze		troilit
5	OJ-4	křemen, kalcit, albit	kaolinit, muskovit	uranofán(?)
7	OJ-5	amorfní fáze, křemen, kalcit	kaolinit	muskovit, sádrovec
7	OJ-6	amorfní fáze, křemen, kalcit	muskovit, cristobalit	
8	OJ-7	amorfní fáze, křemen, kalcit	muskovit, albit, mikroklin	sádrovec, kaolinit
8	OJ-8	amorfní fáze, křemen, kalcit	albit, ortoklas	muskovit, sádrovec, kaolinit, klinochlor
NAV	OJ-10	amorfní fáze, křemen, kalcit	muskovit	cristobalit, troilit, klinochlor
NAV	OJ-11	amorfní fáze, křemen, kalcit	illit	cristobalit, troilit



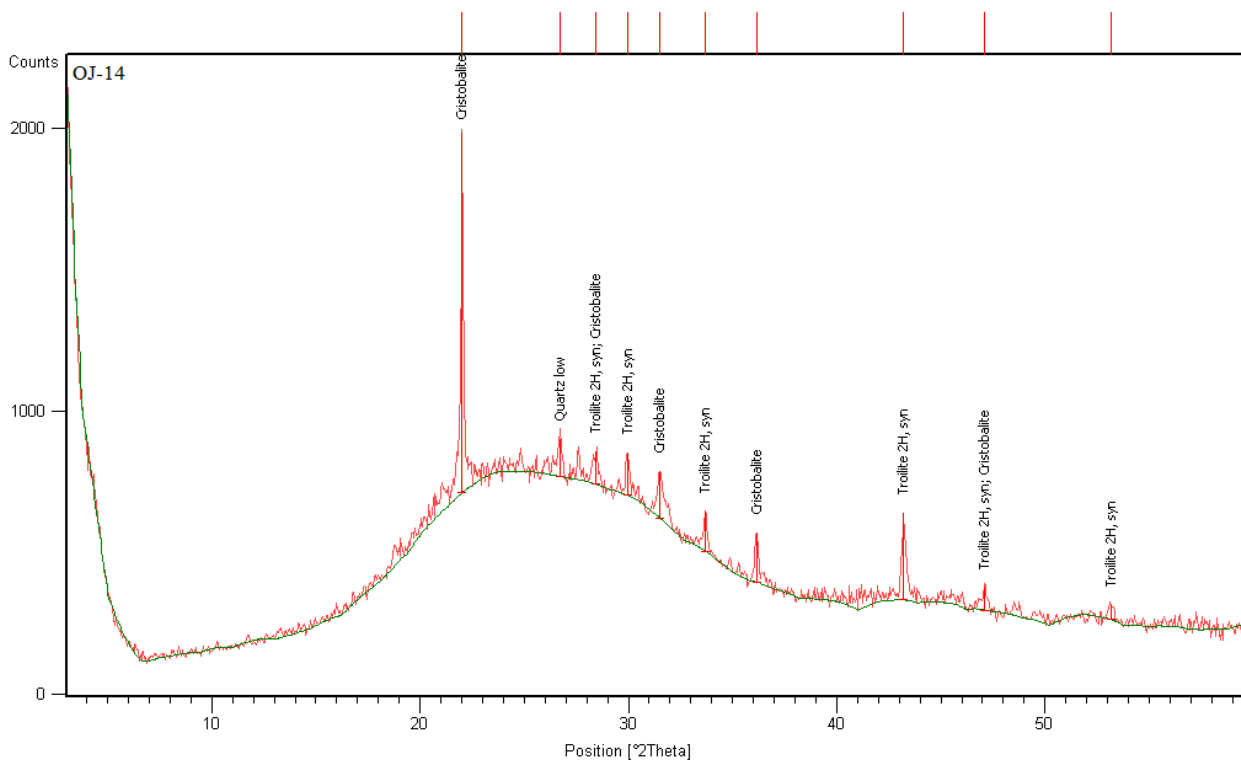
Obr. 20: Difrakční záznam vzorku omítky OJ-6 (dům č. 7).



Obr. 21: Difrakční záznam vzorku malty OJ-10 (NAV).



Obr. 22: Difrakční záznam vzorku OJ-14 (struska z domu č. 1).



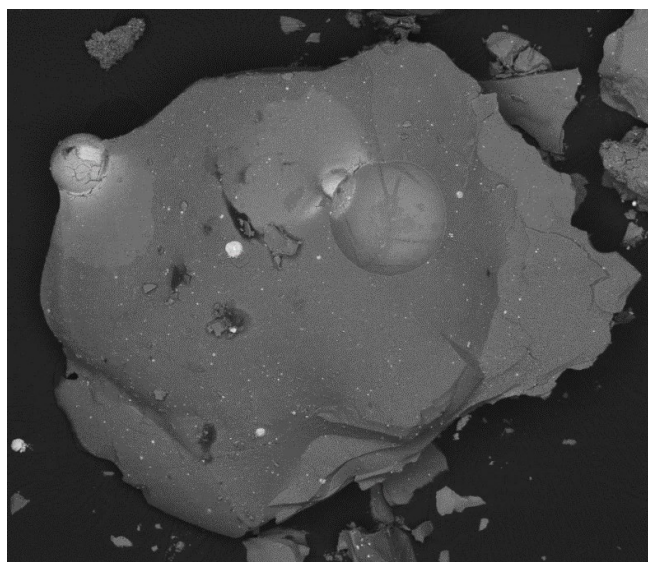
Obr. 23: Difrakční záznam vzorku OJ-14 (struska z domu č. 1).

## 6.8 Elektronová mikroskopie a ED analyzátořem

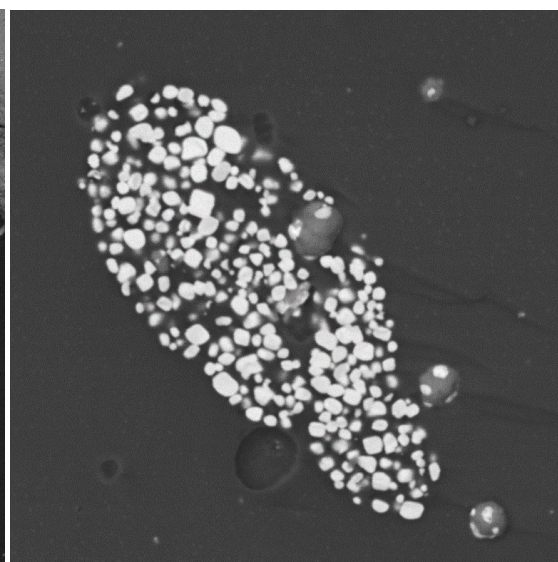
Analyzovaná omítka z domu č. 5 i separované strusky z omítek domů č. 1, 3, 7 i struska z malty nalezená v navážce poblíž náměstí jsou (poněkud asi shodou náhod) složeny ze stejných prvků, převážně z křemíku, vápníku a hliníku (Tab. 6). Strusky obsahují jako inkluze dominantně kuličky FeS (Obr. 24), galenitu a dokonce i framboidy uraninitu s.s. (Obr. 25). Typů inkluzí však bylo zaznamenáno více, v jednom případě (dům č. 1) i částice ryzího Ag, dokládající, že struska pochází nejspíše z procesu hutnění Ag rudy. Fáze s uranem byla nelezena i ve vzorku omítky číslo 5. V případě analyzovaných strusek se podobně jako podle výsledků RTG difrakce i v obrazu ED analytiky s největší pravděpodobností jedná ve všech analyzovaných vzorcích o podobný, či shodný materiál.

Tab. 6: Prvkové složení strusek a omítky z domu č. 5 a chemická povaha obsažených inkluzí, kvalitativně stanovené ED analýzou.

omítka z domu číslo	charakter materiálu	prvky	inkluzie
1	struska	hlavní: Si, Ca, Al	světlé kuličky FeS
		vedlejší: Mg, K, S, Na, F	ryzí Ag
		stopové: Fe, Ti, U	světlejší krychličky 7-8 % U
3	struska	hlavní: Si, Ca, Al	framboidy uraninitu
		vedlejší: Mg, K, Fe, Na	kuličky galenitu
		stopové: P, S	
5	omítka	hlavní: Si, Ca, Al	fáze s uranem (hydratovaný uraninit?)
		vedlejší: K, Mg, Na, Fe, S	
7	struska	hlavní: Si, Ca, Al	
		vedlejší: Mg, K, Na	
		stopové: F, S, Fe, Ti	
NAV	struska	hlavní: Si, Ca, Al	sulfidové kuličky, kuličky FeS
		vedlejší: K, Na, Fe, Mg	
		stopové: S, Ti	



SEM MAG: 312 x SEM HV: 15.00 kV Det: BSE Date(m/d/y): 02/07/23 Name: NAV



SEM MAG: 6.12 kx SEM HV: 15.00 kV Det: BSE Date(m/d/y): 02/07/23 Name: 3-krych

Obr. 24: Zrno strusky s bublinou a sulfidovou kuličkou (FeS), vzorek NAV.

Obr. 25: Framboid krychliček UO<sub>2</sub> (uraninit s.s.) ve strusce z omítky z domu číslo 3 (vzorek OJ-13).

## 6.7 Struska

Laboratorní gama spektrometrií byly zjištěny relativně vysoké aktivity  $^{226}\text{Ra}$  [% eU], ve všech případech vyšší, než v odpovídajících omítkách. U strusky separované z omítky domu č. 3 (OJ-13) to je 3,42 % eU, oproti odpovídající omítce měřené duplikátně s výsledky 2,29 % a 2,48 %. U strusky z domu č. 1 (OJ-14) dosahovala aktivita radia hodnoty dokonce 5,28 % eU, oproti omítce 2,72 % eU. Je tedy nanejvýše pravděpodobné, že tato struska je hlavním nositelem radioaktivity (radia) v omítkách. Instrumentální neutronovou aktivační analýzou byl u strusky OJ-13 zjištěn obsah uranu 1,67 % U. Koeficient radioaktivní rovnováhy u strusky OJ-13 je 205 %, což je nejnižší hodnota ze všech omítek i strusek, kromě odlišné omítky z domu č. 5, která je v blízkosti stavu radioaktivní rovnováhy Ra/U.

Při analýze na elektronovém mikroskopu s ED analyzátozem byla ve strusce zjištěna přítomnost kuliček FeS, kuliček galenitu, ryzího stříbra a byly nalezeny i framboidy krychlíček uraninitu. Metodou práškové rentgenové difrakce bylo zjištěno, že struska je krom amorfních fází složena z cristobalitu, troilitu a v případě strusky z domu č. 1 i s příměsí uraninitu s.s. a barytu, který může být nositelem radia. Dominantně lze však radium očekávat vázané přímo ve skle.

Koeficienty emanace strusek jsou nízké, z domu číslo 1 (OJ-14) je 0,7 % a z domu č. 3 (OJ-13) je <0,5 %, neboť radium je v tomto případě vázáno pevně ve skelné matici.

## 7 Diskuse

V celosvětovém měřítku bylo v několika případech zaznamenáno použití radioaktivního stavebního materiálu. Jedním z těchto případů jsou jáchymovské domy.

O těchto domech se vědělo již od 70. let 20. století, kdy byly některé z nich odhaleny a neaktivnější zbořeny. Neproběhla však podrobnější analýza použitého materiálu (Hůlka a kol. 2008). Následná opatření byla na základě gama spektrometrických měření a diagnostiky vykonána v 90. letech, opět bez studia charakteru materiálu a jeho minerálního složení (Hůlka a Thomas 1999). Cílem rozsáhlých sanací bylo pouze snížení dávkových příkonů záření gama na minimum (Thomas a Moučka 1993). Odstraněný materiál byl odvezen do úpravny uranu, kde byl zpracován. Tento postup lze však zpětně zhodnotit jako zcela nesmyslný, neboť omítky obsahují uranu jen málo, navíc vázaného ve skelné matici, ze které je ho obtížné extrahovat.

Dle Thomase a Moučky 1993 a Hůlky a kol. 2008 byl do omítek a malt přidáván odpadní materiál z výroby uranových barev, jež byl před objevem radia a polonia Marií Curie Skłodowskou považován za bezcenný a byl využíván bez znalosti jeho charakteru. Toto byl však pouze předpoklad nepodložený podrobným studiem materiálu. V této době neexistovaly žádné normy ani předpisy upravující problematiku radioaktivity stavebních materiálů a není tedy divu, že se při stavbách domů hojně používal (Thomas a Moučka 1993, Hůlka a kol. 2008).

Šance, že ze sta v minulosti odhalených budov nějaká zůstane nezasažena „divokou“ sanací v 90. letech 20. století a poskytne tak vzorky pro náš výzkum byla velmi malá, takřka nulová. I přes nízkou pravděpodobnost nálezů se podařilo odhalit 11 domů nezasažených sanací, kde se tento stavební materiál zachoval, nebo se po sanaci zachovaly alespoň jeho zbytky.

Již při odběru vzorků jsme si všimli makroskopicky patrných tmavých kousků obsažených v omítce a mylně jsme se domnívali, že se jedná o částičky uhlí. Při pohledu pod binokulární lupou bylo okamžitě zřejmé, že jsme se mýlili. Bylo jasné, že tento lasturnatě lomný šedý materiál podobný charakterem pazourku obsahuje časté volné bublinky a je tedy antropogenního původu. Po ED analýze na elektronovém mikroanalyzátoru jsme zjistili, že tato látka je ztuhlá silikátová tavenina, která na čerstvém lomu obsahuje mnoho inkluzí sulfidických kuliček, vykrystalizované framboidy krychliček uraninitu a kuliček galenitu. Je to typická metalurgická struska. Také byla v jednom případě nalezena inkluze ryzího stříbra, což dokládá její souvislost s hutnictvím stříbra.



Naše studium odhalilo, že materiál použitý jako stavební materiál do omítek a malt není v žádném případě zbytek z extrakce uranu, pocházející z uranové továrny, jak předpokládali předchozí autoři (Thomas a Moučka 1993, Hůlka a kol 2008). V moderní literatuře je také široce rozšířen omyl, že zbytky z extrakce uranu byly považovány před objevem radia za bezcenné a byly vysypávány do potoka Veseřice (Suldovký a Horák 2009, Horák 2011). Fragmentární zmínky v historických pramenech hovoří však o tom, že radiové zbytky byly hutněny spolu s rudami stříbra, pokud k tomu opravňoval jejich konkrétně zjišťovaný obsah stříbra (Seidlerová, Seidler 2007). Během hutnění pak vznikly tyto tmavé vitrifikované strusky, jež byly následně drceny a pro své mechanické vlastnosti využity (nejspíše prodávány) jako ostřívo do omítek. Nebyl to tedy jistě materiál bezcenný.

Po srovnání výsledků laboratorní gama spektrometrie deemanovaných a emanovaných vzorků strusek byly zjištěny velmi nízké koeficienty emanace. Nositelem radionuklidů (zejména radia) je prokazatelně tato hutní struska obsažená v omítkách a maltách. Nízkých koeficientů plošné emanace omítek si všimnuli už Thomas a Moučka 1993, ale neznali příčinu tohoto jevu. Naším podrobným studiem a analýzou materiálu bylo zjištěno, že černé sklovité kousky mají nízké koeficienty emanace a jsou nositeli radionuklidů v omítce. Nízké koeficienty emanace měly kromě omítky z domu č. 5 všechny vzorky. Jediný vzorek OJ-4 (dům č. 5) totiž neobsahoval strusky.

Již při prvním pohledu na difrakční záznamy vzorků strusek je jasné, že to je látka amorfního charakteru obsahující příměs cristobalitu, troilitu a dokonce i uraninitu. Přítomnost cristobalitu poukazuje na tepelné zpracování materiálu při teplotách nad 1025 °C. Troilit zas fázově charakterizuje modifikaci přítomných sulfidických inkluzí (FeS), jež byly viditelné pod elektronovým mikroskopem, a dokládá silně redukční prostředí při tavně. Při pohledu na difrakční záznamy zbylých omítek je jasné, že musí obsahovat též strusky, jelikož je dobře viditelný projev amorfní fáze. Krom toho jsou omítky složeny převážně z křemene a kalcitu, tedy typických fází vápenných omítek a malt. Příměsi tvoří kaolinit, sádrovec, občas i slída.

Omítka z domu č. 5 se složením liší a vzhledem ke stavu budovy i tvrdosti materiálu je nejspíše výrazně mladší než ostatní omítky. Koeficient emanace vzorku této omítky byl nejvyšší ze všech, téměř 7,5 %. Pod elektronovým mikroskopem byly v tomto vzorku nalezeny fáze s uranem (hydratovaný uraninit?), stejně tak byla přítomnost uranu zjištěna i metodou práškové rentgenové difrakce (nejistý uranofán). Materiál má obsahy okolo 0,35 % U i eU ( $^{226}\text{Ra}$ ), je kvalitativně uranovou rudou, s koeficientem radioaktivní rovnováhy blízkým 100 %.



Domníváme se, že omítka domu č. 5 pochází z poválečné etapy těžby uranu, kdy byla uranová ruda (mletá byla jistě „k dispozici“ např. na gravitační úpravně Eliáš, např. Pauliš a kol. 2016) použita z ne zcela zřejmého důvodu některým ze zaměstnanců jako stavební materiál.

Dnes je již systém hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech ukotven v atomovém zákoně (263/2016 Sb.) a jeho prováděcím předpisu (vyhláška 422/2016 Sb., O radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje). Tyto předpisy stanovují výrobcům a dovozcům stavebních materiálů povinnosti vztahující se k systematickému měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech a udávají mezní hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu. Pro materiály použité pro stavbu s obytnými nebo pobytovými místnostmi je limit stanoven na 300 Bq/kg  $^{226}\text{Ra}$ . Na základě porovnání hmotnostních aktivit analyzovaných omítek s doporučeními, kromě případu neaktivní omítky OJ-9 (dům č. 10), žádná neodpovídá současným normám. Hmotnostní aktivita analyzovaných omítek (bez směsného vzorku OJ-7, OJ-4 z domu č. 5 a separovaných strusek) se pohybovala v rozmezí 283 až 550 kBq/kg  $^{226}\text{Ra}$  a norma tedy byla překročena 943 – 1832krát, což je překročení o tři řády.

## 8 Závěr

Cíle této práce se podařilo za využití moderních technologií a poznatků ze současnosti i minulosti naplnit. Byly nalezeny, proměřeny a ovzorkovány jáchymovské domy se zvýšenou radioaktivitou stavebních materiálů, byly zjištěny základní charakteristiky obsahu hlavních radionuklidů, byl v zásadních rysech poznán mineralogický a fázový charakter tohoto materiálu i rozpoznán důvod pro jeho použití jako stavební hmoty.

Bylo nalezeno celkem 11 domů se zvýšenou radioaktivitou stavebního materiálu, které nebyly během sanace těchto materiálů zbaveny. Zde se podařilo odebrat velmi zajímavé vzorky malt a omítek se zvýšenou radioaktivitou. Na rozdíl od předchozích úvah regulačních orgánů bylo zjištěno, že nebyl používán přímo materiál z uranové továrny, ale příčinnou zvýšené radioaktivity a hlavním nositelem radionuklidů jsou strusky, jež byly produktem hutnění stříbra v Jáchymově ve 2. polovině 19. století. Hlavním důvodem historického použití strusek byl jejich ostrohranný, sklovitý charakter, pro něž byly přidávány do malt a omítek zřejmě jako vynikající ostřivo.

Tato skutečnost byla prokázána analytickými metodami a studiem mineralogického charakteru vzorků zcela jednoznačně.

Vzniklý stavební materiál je z hlediska dnešních norem mimořádně problematický, dle způsobů a stylu jeho historického použití se zdá být zvyše popsaných důvodů zcela logický.

Nalezené historické budovy jsou velmi cennými a unikátními doklady užití z dnešního pohledu nevhodného stavebního materiálu. Tyto objekty je však nutno chápat jako naše významné kulturní a technologické dědictví, vázané ve světovém měřítku na zcela mimořádnou historii města Jáchymov, spojenou s dobýváním stříbra, uranu a radia. Proto se domníváme, že tyto objekty by již neměly být dále ničeny, neboť jsou velice cenné a nabízí kromě své unikátnosti a historické hodnoty také mnoho možností pro poučení i příležitostí pro další studium.

## 9 Seznam literatury a zdrojů

Balling, K. A. (2013). *Die Metallhüttenkunde: Gewinnung der Metalle und Darstellung ihrer Verbindungen auf den Hüttenwerken*. Springer-Verlag, 618s.

Čechák, T., Moučka, L., Jiránek, M., Froňka, A., & Thinová, L. (2008). Investigation and remediation of houses affected by radon phenomena connected with earlier exploration of silver and uranium ore. *Radiation protection dosimetry*, 130(1), 64-67.

Duraj, M., Niemiec, D., Yang, S., Cheng, X., Kubac, J., & Montero, O. A. (2019). Several Primacies of Jáchymov Town and Their Significance for Geotourism. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 221, No. 1, p. 012150). IOP Publishing.

Eyles, J. M. (1956). Georgius Agricola. *Nature*, 177(4521), 1144-1145.

Hůlka, J., & Thomas, J. (1999). *Remedial measures in Czech houses with high radium content in building material* (No. IAEA-SM--359). International Atomic Energy Agency (IAEA), 109-111.

Hůlka, J., Vlcek, J., & Thomas, J. (2008, September). Natural radioactivity in building materials-Czech experience and European legislation. In *Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists. 2008 International Symposium, Las Vegas, NV, September* (str. 14-17).

Hwang, J. Y., Chang, J. B., & Chang, W. P. (2001). Spread of <sup>60</sup>Co contaminated steel and its legal consequences in Taiwan. *Health physics*, 81(6), 655-660.

Chang, W. P., Chan, C. C., & Wang, J. D. (1997). <sup>60</sup>Co contamination in recycled steel resulting in elevated civilian radiation doses: causes and challenges. *Health Physics*, 73(3), 465-472.

Ingles J.C., Sutarno R., Bowman W.S. & Faye G.H. (1977): Radioactive ores DH-1, DL-1, BL-1, BL-2, BL-3 and BL-4 – Certified reference materials. CANMET - Canada Centre for Mineral and Energy Technology. Report 77-64. Ottawa. 22s.

Jahn, V. J., Jahn, V. Z. (1879). Kronika práce, osvěty, průmyslu a nálezův. *Chemické vzdělávání surovin, IV. díl.*, 119-221.

Macklis, R. M. (1990). Radithor and the era of mild radium therapy. *Jama*, 264(5), 614-618.

Ondruš, P., Veselovský, F., Gabasova, A., Hloušek, J., Srein, V., Vavrin, I., & Drabek, M. (2003). Primary minerals of the Jáchymov ore district. *Journal of GEOsciences*, 48(3-4), 19-147.

Orient, J. M. (2014). Fukushima and reflections on radiation as a terror weapon. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 19(2), 48-55.

Patera, A. (1854). Über fabrikmässige Darstellung von Urangelb. *Journal für praktische Chemie*, 61(1), 397-398.

Pauliš, P., Babka, K., Sejkora, J., & Škácha, P. (2016). Uranové minerály České republiky a jejich nejvýznamnější naleziště, *Kuttna, Kutná Hora*. 557s.

Poková, E. (1994). Historie jáchymovského uranu. *Vesmír* 73, 504.

René, M. (2018). History of uranium mining in central Europe. *Uranium-Safety, Resources, Separation and Thermodynamic Calculation. Intechopen, London*, 1-20.

Robinson, A. B. (2013). Radiation hormesis, cancer, and freedom in American medicine. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 18(3), 74-77.

Schreiner, L. J., Joshi, C. P., Darko, J., Kerr, A., Salomons, G., & Dhanesar, S. (2009). The role of Cobalt-60 in modern radiation therapy: Dose delivery and image guidance. *Journal of medical physics/Association of Medical Physicists of India*, 34(3), 133.

Steger, H. F., Faye, G. H., Bowman, W., & Sutarno, R. (1979). New CCRMP Reference Uranium ore BL-5 And Sulphide Concentrates CCU-I, CPB-1 and CZN-1. *Geostandards Newsletter*, 3(2), 173-175.

Škácha, P., Plášil, J., & Horák, V. (2019). *Jáchymov: mineralogická perla Krušnohoří*. Academia, 682s.

Thomas, J., & Moucka, L. (1993). PLASTERS AND MORTARS WITH EXTREMELY HIGH CONCENTRATIONS OF RADIUM IN JOACHIMSTHAL. In: Proceedings of the 3rd International Conference of *HIGH LEVELS OF NATURAL RADIATION*, Ramsar, IAEA Vienna. 183-190.

Thomas, J. (1996). Unified radon diagnostics for START type houses built of slag-concrete from the Rynholec site; Jednotná radonová diagnostika pro domy START z rynholeckého skvarobetonu, *SÚRO*. 4-5.

Veselovský, F., & Ondruš, P. (1997). Historie jáchymovského (Joachimsthal) rudního revíru. *Journal of GEOsciences*, 42 (4), 127-132.

VESELY, T. (1985). Jáchymov uranium deposit. *Krystalinikum*, 18, 133-165.

Vobecký, M. (1999). Contribution of the industrial chemical processing of pitchblende in Jáchymov to the first isolation of radium. *Czechoslovak journal of physics*, 49(Suppl 1), 35-40.

Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.

Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů.

**Internetové zdroje:**

Hloušek, J. (2011). Horský urbanistický skvost, který o návštěvníky nestojí.  
<http://www.jachymov-joachimsthal.cz> (21.3.2023)

Jak se v Jáchymově dobýval uran  
<https://www.zdarbuh.cz/reviry/jd/jak-se-v-jachymove-dobyval-uran/> (25.3.2023)

Pramen Pod Skalou  
<https://www.estudanky.eu/12362-pramen-pod-skalou> (30.3.2023)