



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

**Obsah radonu ve stavebních materiálech a jeho vliv
na zdraví člověka**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:

OCHRANA OBYVATELSTVA

Autor: Miluše Štěpánová

Vedoucí práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

České Budějovice 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci s názvem „*Obsah radonu ve stavebních materiálech a jeho vliv na zdraví člověka*“ jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby bakalářské práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé bakalářské práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 3. 5. 2017

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly při zpracování této bakalářské práce. Také bych ráda poděkovala Mgr. Jiřímu Havránkovi a Albertovi Vianimu, Ph.D. za spolupráci ve výzkumné části práce. A nakonec bych chtěla poděkovat své rodině za podporu, toleranci a trpělivost, bez které by tato práce nemohla vzniknout.

Obsah radonu ve stavebních materiálech a jeho vliv na zdraví člověka

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou radonu ve stavebním materiálu, konkrétně v cihlách. Pro zjištění závislosti obsahu radonu na chemickém a mineralogickém složení cihel byly odebrány čtyři druhy cihel ve třech replikách. Tyto vzorky byly rozděleny do dvou skupin. První skupinu tvoří vzorky cihel Ytong, jehož výrobcem je Xella CZ s.r.o. sídlící v Hrušovanech u Brna, a Porfix, vyráběný v Porfix CZ a.s. v Trutnově. Jsou to tzv. autoklávované pórobetony. Jedná se o nejvýznamnější druh přímo lehčeného betonu, jehož hlavní složkou je cement, vyráběný z portlandského slínku, vápno, písek, voda a energosádrovec. Druhou skupinu tvoří cihly Heluz, vyráběné v podniku Heluz cihlářský průmysl v.o.s v Dolním Bukovsku, a plná cihla odebraná jako historický materiál z klášterní zdi v Nové Říši. Výsledky byly porovnány s odbornými články a certifikovanými hodnotami indexu hmotnostní aktivity.

Obsah radonu byl stanoven nepřímo, pomocí indexu hmotnostní aktivity na polovodičové gama spektrometrii. Byly změřeny tři nejčastěji sledované přírodní radionuklidy ^{40}K , ^{226}Ra a ^{232}Th , přičemž pro výskyt radonu jsou podstatné pouze ^{226}Ra a ^{232}Th , ze kterých radioaktivní přeměnou radon vzniká. Pro chemickou analýzu byla zvolena metoda opticko-emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem. Pro lepší představu o složení vzorků byla použita metoda rentgenové práškové difrakce, která pomocí rentgenového záření stanovila obsah minerálů.

Cihly keramických materiálů měly oproti autoklávovaným pórobetonům přibližně třikrát vyšší hodnoty hmotnostní aktivity ^{40}K , ^{226}Ra a ^{232}Th , což souvisí s vysokým obsahem hlinitokřemičitanů pocházejících z vyvřelých a přeměněných hornin.

Klíčová slova

radon; opticko-emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem; rentgenová difrakční analýza; cihly; zdraví

Content of radon in the building materials and its influence on human health

Abstract

This bachelor thesis deals with presence of radon gas in brick building materials. Three samples of each of four examined brick kinds were used – divided into two separate groups – to investigate the relationship between the chemical-mineralogical composition and radon concentration. First group – consisting of Ytong and Porfix brands of brick – collects autoclaved aerated concrete blocks. Being considered major type of lightweight concrete-based materials, it consists of Portland cement, lime, sand, water, and calcium sulfate. Second group collects Heluz brand bricks and historical bricks taken from the wall in the Nová Říše Monastery, both kinds being clay-based fired bricks. Results were compared with a number of relevant studies and certificated values of the activity concentration index.

Using data from semiconductor-based gamma spectroscopy detector, the radon concentration was measured indirectly, through the activity concentration index. Three of the most prominent natural radionuclides potassium-40, radium-226 and thorium-232, known to form radon through their radioactive decay, were subject to the measurements. Inductively coupled plasma optical emission spektrometry (ICP-OES) method was chosen as appropriate for chemical analysis. To ensure effective comprehension with structure and physicochemical properties of the samples, X-ray crystallography was used to provide mineral content measurement.

Activity concentration values of the clay-based fired bricks were as much as three times higher than those of autoclaved aerated concrete blocks. This was due to high content of phyllosilicates originated from igneous and metamorphic rocks.

Keywords

radon; inductively coupled plasma optical emission spectrometry; X-ray crystallography; bricks; health

OBSAH

OBSAH	6
ÚVOD.....	8
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	9
1.1 Radon	9
1.1.1 Historie radonu v České republice.....	10
1.1.2 Dceřiné produkty radonu	11
1.1.3 Radon v České republice	12
1.1.4 Radon ve světě.....	14
1.1.5 Radon v budovách	14
1.1.6 Vliv na zdraví člověka	15
1.2 Stavební materiály.....	15
1.2.1 Radioaktivita ve stavebních materiálech	16
1.2.2 Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot	16
1.2.3 Autoklávovaný pórobeton	18
1.2.4 Keramické materiály.....	20
2 CÍL PRÁCE A VÝZKUMNÁ OTÁZKA	25
2.1 Cíl práce	25
2.2 Výzkumná otázka.....	25
3 METODIKA VÝZKUMU.....	26
3.1 Úprava vzorků cihel	27
3.1.1 Úprava vzorků pro gamaspektrometrickou analýzu	28
3.1.2 Úprava vzorků pro chemickou analýzu	28
3.1.3 Úprava vzorků pro mineralogickou analýzu.....	29
3.2 Měření vzorků cihel	29
3.2.1 Gamaspektrometrická analýza	29
3.2.2 Chemická analýza.....	32
3.2.3 Mineralogická analýza.....	35

4	VÝSLEDKY	41
4.1	Výsledky gamaspektrometrické analýzy.....	41
4.2	Výsledky chemické analýzy.....	45
4.3	Výsledky mineralogické analýzy vzorků cihel	46
5	DISKUZE	48
5.1	Posouzení výsledků gamaspektrometrické analýzy	48
5.2	Posouzení výsledků chemické analýzy	49
5.3	Posouzení výsledků mineralogické analýzy.....	49
5.4	Shrnutí výsledků.....	50
6	ZÁVĚR	52
7	SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	53
8	SEZNAM ZKRATEK	57
9	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	58
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	59

ÚVOD

Po celou dobu své existence je lidstvo vystavováno malým dávkám ionizujícího záření z přírodních radionuklidů a kosmického záření. Stavební materiál nerostného původu obsahuje vždy nějaké množství radioaktivních látek. Mezi nejvýznamnější patří izotopy uranu a thorium. Tyto prvky tvoří základ tří rozpadových řad. Pro obsah radionuklidů ve stavebním materiálu jsou sledovány tři nejdůležitější izotopy: draslík ^{40}K , radium ^{226}Ra a thorium ^{228}Th , ze kterých se počítá index hmotnostní aktivity. Prvkem uran-radiové rozpadové řady je thorium ^{232}Th , které se radioaktivní přeměnou rozpadá na radium ^{226}Ra a přeměna dále pokračuje na radon ^{222}Rn . Samotný radon je mnohem méně škodlivý než jeho dceřiné produkty. V plicní tkáni se nezachytává a z největší části je v nezměněné formě opět vydechnut. Pro vnější části lidského těla nepředstavuje radon a jeho dceřiné produkty žádné nebezpečí. Problém nastává, až když dceřiné produkty radonu vytvoří s prachem aerosol, který se vzduchem dostává do plic člověka, kde se ukládá a poškozují tkáňové buňky. Při větší koncentraci a delším působení může vzniknout i rakovinné bujení. V České republice je průměrná hodnota ekvivalentní objemové aktivity radonu v budovách asi 120 Bq/m^3 . Přibližně 2–3 % domů má vyšší hodnoty než 400 Bq/m^3 . Patříme tedy k zemím s nejvyšší koncentrací radonu v bytech na světě. Vzhledem k velkému výskytu radonu v obydlích jsem si jako cíl bakalářské práce zvolila zjistit, zdali má na jeho koncentraci vliv chemické a mineralogické složení stavebních materiálů.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Tato bakalářská práce se zabývá závislostí obsahu radonu ve stavebních materiálech na jejich chemickém a mineralogickém složení. Z tohoto důvodu bylo nutné provést gamaspektrometrickou, chemickou a mineralogickou analýzu. V České republice je hodnota aktivity radonu velmi vysoká a jeho výskyt v budovách se považuje za druhou, po kouření nejvýznamnější příčinu rakoviny plic.

Ne všechny kombinace počtu protonů a neutronů tvoří stabilní jádra. Prvky s nestabilními jádry se samovolně přeměňují na jádra jiných prvků. Tato přeměna se nazývá radioaktivní – radioaktivita. Radioaktivní jsou ty atomy, jejichž jádra nejsou v čase stabilní a samovolně se mění na jádra jiná. Ta mohou být opět radioaktivní, nebo jsou již stabilní. Přeměna nestabilních jader obsahujících nadbytek energie je provázána emisí částice, kvanta elektromagnetického záření nebo zachycením elektronu z elektronového obalu. Účelem radioaktivní přeměny je dosažení stability atomu (Navrátil a kol., 2010).

1.1 Radon

Radon je radioaktivní vzácný plyn, běžně se vyskytující v přírodě, tudíž i ve stavebních hmotách. Je netečný, rozpustný ve vodě, bez barvy a bez zápachu. Přírodně se vyskytují tři izotopy radonu: radon ^{222}Rn , thoron ^{220}Rn a actinon ^{219}Rn . Jako jediný z plynů je součástí radioaktivní rozpadové řady uranu ^{238}U . Ten je v rozličných koncentracích přítomný v celé zemské kůře (Rosario a Wichmann, 2006).

V různých koncentracích se radon nachází ve všech půdách a nerostech. Zlomek tohoto množství uniká do atmosféry, což ještě posiluje všudypřítomnost radonu v našem okolí. Vlivem rozředění ovzduší při atmosférických procesech jsou však jeho hodnoty ve vzduchu poměrně nízké. To však neplatí pro uzavřené prostory. Zejména v domech, jeskyních a podpovrchových dolech se může radon vyskytovat ve vysoké koncentraci (Chambers a Zielinski, 2011).

V přírodě se vyskytuje 37 radioaktivních prvků. Některé prvky se vyskytují ve formě více radioizotopů, celkem se v přírodě vyskytuje 73 radionuklidů. Z uvedených přírodních radionuklidů se obvykle sledují pouze tři: radioaktivní izotop draslíku ^{40}K , izotopy radia ^{226}Ra a thoria ^{232}Th (Svoboda, 2013).

1.1.1 Historie radonu v České republice

Nebezpečí radonu je u nás spojováno především s uranovými doly. V roce 1952 W. F. Bale a nezávisle na něm akademik F. Běhounek objevili hlavní důvod vzniku rakoviny plic – vdechování krátkodobých produktů přeměny radonu (polonia, bismutu a olova), jejich usazování na povrchu dýchacích cest a z toho vyplývající ozařování kmenových buněk výstelky dýchacích cest. Objev vedl k cílenému úsilí snížit výskyt této choroby u horníků v uranových dolech a ke snaze kvantifikovat toto profesionální riziko - najít vztah mezi expozicí produktů přeměny radonu a rakovinou plic. To bylo provedeno epidemiologickými studiemi rakoviny plic u vybraných skupin horníků, u nás organizované doktorem Ševcem. Již v roce 1956 zjistil Hultqvist výskyt radonu v bytech ve Švédsku. Mělo se však za to, že se jedná o specifický lokální problém a informace zapadla. Teprve v 70. letech 20. století byly vysoké koncentrace radonu objeveny i v dalších zemích a byly zahájeny národní antiradonové programy. U nás byla příprava na radonový program započata v roce 1978 v Jáchymově. Ukázalo se, že jde o světově unikátní situaci způsobenou přirozeně vyšším radonovým rizikem podloží, navíc místy kontaminovaným zbytky po historické těžbě stříbrné rudy obsahující i uran, a také tím, že ve městě bylo použito do stavebních materiálů vysoce radioaktivních odpadů z místní výroby uranových barev a posléze i výroby radia (SÚRO, 2017).

V letech 1980–1981 byly objeveny v pórobetonu z Poříčí u Trutnova koncentrace radia vyšší, než připouštěla připravovaná norma. Příčinou byl elektrárenský popílek právě místní elektrárny v Poříčí, která spalovala černé uhlí ze žacléřsko-svatoňovické uhelné pánve s bohatě uranově mineralizovanou slojí Baltazar. Bylo vydáno rozhodnutí snížit ve vyráběném stavebním materiálu obsah radia, přestože koncentrace radonu v bytech,

kde byl tento materiál použit, překročily chystanou normu pro obsah radonu v ovzduší budov pouze v řádu několika procent (SÚRO, 2017).

Dalším případem výskytu vyšší koncentrace radonu bylo použití škváry po bývalé revírní elektrárně v Rynholci u Nového Strašecí pro výrobu stavebního materiálu. Ta obsahovala v průměru asi čtyřikrát více radia než pórobeton z Poříčí. Příčinou byla opět uranonosná sloj bývalého dolu Anna v rakovnické části kladenské uhelné pánve.

První signál přišel dávno před radonovou érou, už kolem roku 1960. V té době bohužel pro tuto problematiku neexistovaly hygienické normy. Posuzovalo se pouze ozáření způsobené gama zářením vysílaným škvárobetonovými bloky obvodových zdí, které bylo uprostřed místnosti nejvýše dvojnásobné oproti běžným hodnotám v domech. Hlavní hygienik rozhodl, že postavené domy se sanovat nebudou, ale zlepší se další výroba škváry. Po roce 1968 nové vedení národního podniku Prefa Hýskov v Rynholci začalo z tohoto materiálu vyrábět škvárobetonové panely pro montované domy typu START, kterých bylo vyrobeno celkem okolo tří tisíc. Problém se začal řešit ještě před rokem 1989. Vláda pod tlakem sdružení majitelů nabídla výkup nebo sanaci domů. V polovině 80. let minulého století byly nalezeny domy s nečekaně vysokými koncentracemi radonu, přitom příčinou bylo prokazatelně pronikání radonu z podloží. Ve spolupráci s Českým geologickým ústavem byly vytipovány oblasti s předpokládaným nízkým, středním a vysokým radonovým rizikem, a připraveny mapy radonového indexu. Postupně bylo zahájeno systematické proměrování území republiky a zájem veřejnosti i vlády se přenesl na problém radonu z podloží. Dále bylo také zahájeno ověřování sanačních postupů a jejich financování (SÚRO, 2017).

1.1.2 Dceřiné produkty radonu

Poločas rozpadu radonu je přibližně 90 hodin. Při rozpadu vyzařuje ionizující záření ve formě alfa částic. Biologické efekty radonu je nutné připisovat především produktům jeho štěpení, tedy dceřiným produktům. Jedná se především o ty krátkodobé, s poločasem rozpadu do třiceti minut. Mezi ně patří například izotopy těžkých kovů,

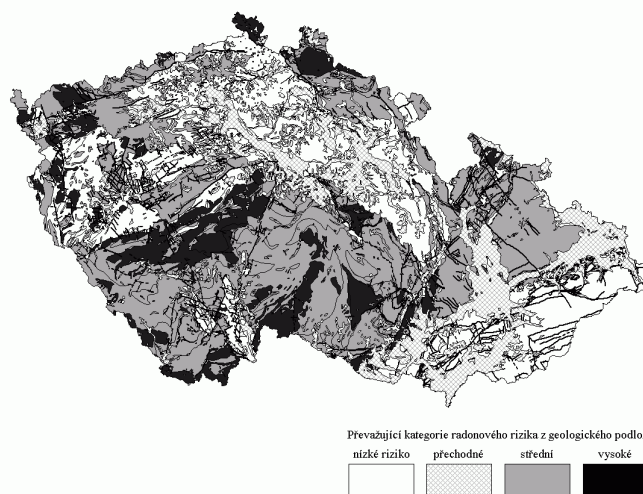
jako jsou izotopy polonia ^{214}Po a ^{218}Po , které se většinou smísí s prachovými částicemi, nebo tvoří shluky s molekulami vody (Rosario a Wichmann, 2006).

Samotný radon je mnohem méně škodlivý než jeho dceřiné produkty. V plicní tkáni se nezachytává a z největší části je v nezměněné formě opět vydechnut. Záření α ohrožuje jen citlivou plicní tkáň nechráněnou pokožkou. Pro vnější části lidského těla nepředstavuje radon a jeho dceřiné produkty žádné nebezpečí. Problém nastává, až když dceřiné produkty radonu vytvoří s prachem aerosol, který se vzduchem dostává do plic člověka, kde se ukládá a poškozují tkáňové buňky. Při větší koncentraci a delším působení může vzniknout i rakovinné bujení (Svoboda, 2013).

1.1.3 Radon v České republice

Průměrná hodnota radonu v České republice je 118 Bq/m^3 . Patříme tedy k zemím s nejvyšší koncentrací radonu v bytech na světě. Radon se v různém množství nachází ve všech objektech. Konkrétní množství v domě souvisí s koncentrací radonu v podloží pod objektem. Díky znalosti geologického podloží můžeme identifikovat vyšší pravděpodobnost výskytu budov s vysokým obsahem radonu (SÚJB, b.r.).

Českou geologickou službou byla sestavena prognózní mapa radonového indexu (Obrázek 1), která rozděluje území republiky z hlediska nebezpečí výskytu radonu



Obrázek 1: Geologická prognózní mapa, zdroj: SÚRO, 2017

na oblasti s nízkým, přechodným, středním a vysokým radonovým indexem. Přibližně 2–3 % domů má vyšší hodnoty než 400 Bq/m^3 . Jsou to především přízemní části rodinných domů. Jejich rozmístění po České republice je velmi nerovnoměrné. V rámci radonového programu již bylo proměřeno více jak 150 000 objektů. Na základě získaných hodnot byla vytvořena mapa výsledků koncentrace radonu v objektech, znázorňující pro každou měřenou obec podíl nalezených objektů nad směrnou hodnotu 400 Bq/m^3 (SÚJB, b.r.).

Nejprve byla problematika radonu řešena vyhláškou Ministerstva zdravotnictví České republiky č. 76/1991 Sb., o požadavcích na omezování ozáření z radonu a dalších přírodních radionuklidů. Následovala usnesení vlády k radonové problematice č. 150/1990 a č. 709/1993, která umožnila poskytnutí státních dotací na protiradonová opatření. V roce 1997 ji poprvé upravuje zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a vyhláška č. 184/1997 Sb., o požadavcích na zajištění radiační ochrany (SÚRO, 2017).

V roce 1999 vyšlo usnesení vlády č. 538/1999 o Radonovém programu České republiky, které zahájilo Radonový program. Ten se zabýval vyhledáváním již existujících objektů s vysokou koncentrací radonu, preventivním protiradonovým opatřením, informováním veřejnosti o programech vývojové a výzkumné činnosti. Program umožnil i poskytnutí státní dotace na protiradonová opatření prostřednictvím nejprve okresních, poté i krajských úřadů. Program je považován za velmi úspěšný a radonová politika České republiky je mezinárodně uznávaná. V roce 2009 vydala Světová zdravotnická organizace (WHO) stanovisko, ve kterém radon v bytech považuje za druhou, po kouření nejvýznamnější příčinu rakoviny plic. V témže roce bylo připraveno nové vládní usnesení k radonu: „Radonový program ČR 2010 až 2019 – Akční plán“. Jeho cílem je především prohloubit informovanost i zájem občanů o snížení radonu v budovách (SÚRO, 2017).

1.1.4 Radon ve světě

Ve Švédsku, Finsku, Irsku, části Norska, na jihozápadním výběžku Anglie, ale i v části Portugalska a Francie, Švýcarska, Řecka nebo v některých částech USA a Kanady, se vyskytuje obdobné geologické podloží jako v České republice, které je tvořeno z větší části vyvřelými a metamorfovanými horninami. Oba tyto typy hornin se vyznačují vysokými průměrnými koncentracemi ^{222}Ra . Pokud porovnáme nejvyšší průměrné hodnoty hladin radonu ve vnitřním ovzduší domů a bytů výše uvedených států Evropy s koncentracemi radonu v domech a bytech v České republice, tak lze jednoznačně konstatovat, že je u nás problém radonu extrémní a svým rozsahem jedinečný na světě (Radon test, b.r.).

1.1.5 Radon v budovách

Existují tři hlavní způsoby, jak může radon proniknout do budovy: uvolňováním ze stavebních materiálů, prouděním vzduchu skrz trhliny a netěsnosti, nebo difúzí z půdy skrze póry ve stavebních materiálech. Uvolňování radonu ze stavebních materiálů nehraje nikterak důležitou roli, pokud jsou místnosti odvětrávány několikrát za hodinu. V opačném případě může koncentrace radonu dosáhnout nebezpečné úrovně (Chauhan a kol., 2008).

V důsledku proudění vzduchu v místnostech se radon rozptýlí po celém domě. Jeho koncentrace se však mění v závislosti na ročním období. Nejvyšší koncentrace radonu bývá zaznamenávána v nevětraných sklepních a přízemních místnostech. Výskyt radonu může ovlivňovat zdraví člověka nejen v obytných a rodinných domech. Kupříkladu historické budovy a muzea jsou tvořeny rozsáhlými uzavřenými prostory, což významně podporuje hromadění radonu – mohou obsahovat vysoké koncentrace. K tomu přispívají materiály využití v samotné stavbě nebo ve vystavovaných uměleckých exponátech, například granit. Jelikož je radon pro své chemicko-fyzikální vlastnosti nefiltrovatelný, sledování jeho množství se stává hlavním způsobem, jak ochránit veřejné zdraví (Navrátil, 2005; Nastro a kol., 2016).

Určitý vliv na množství radonu uvnitř budov by mohly mít kromě konstrukčních nedokonalostí a koncentrace radonu v podloží také tektonické zlomy nebo praskliny. Analýzy pomocí katastrálních map s podrobnými informacemi o radonu uvnitř budov však naznačují, že domy postavené v místě tektonického zlomu mohou vykazovat stejně tak vysoké i nízké koncentrace. To znamená, že kvalitní základy nebo stáří budovy jsou z hlediska radonové koncentrace patrně významnější, než přítomnost tektonických narušení hluboko pod stavbou (Thomas a kol., 2002).

1.1.6 Vliv na zdraví člověka

Jak již bylo uvedeno, samotný radon není pro člověka nebezpečný. Jeho zdraví však mohou ohrozit produkty štěpení radonu, které se usazují v průduškách a plicních sklípcích, a ozařují je. Nebezpečné jsou především proto, že jimi vyzařované částice α o doletu několika desítek μm soustředí veškerou svoji energii do malé oblasti tkáně plic. Nejcitlivější je tzv. tracheobronchiální oblast plic. Lékařský výzkum dospěl k závěru, že toto ozařování je jedním z faktorů podílejících se na vzniku rakoviny plic. Ozáření plicní sliznice je dále závislé na věku, rychlosti dýchání, samočisticí schopnosti plic a na celkovém stavu jedince. Výsledky měření průměrného ročního efektivního dávkového ekvivalentu se od sebe z uvedených důvodů značně liší. Lze ale říci, že pravděpodobnost vzniku rakoviny plic je úměrná celkové vdechnuté aktivitě produktů štěpení radonu, tj. závisí na koncentraci radonu a délce pobytu v místnosti s jeho určitou koncentrací. Z měření uskutečněných u nás i v zahraničí vyplývá, že produkty štěpení radonu mají na svědomí 10–30 % onemocnění rakovinou plic (Navrátil, 2005).

1.2 Stavební materiály

S koncentrací radonu v lidských obydlích je úzce spjat stavební materiál, ze kterého je daný dům postaven. Mezi stavební materiály můžeme zařadit i autoklávované

pórobetony a keramické materiály. Mezi stavební hmoty řadíme nejen vlastní stavební materiály, ale i suroviny používané k jejich výrobě. Patří sem i pomocné látky usnadňující provádění stavebních technologických operací. Řada stavebních materiálů je dostupná v mnoha látkových modifikacích a rozdíly ve vlastnostech mohou být podstatné. Na první místo jsou kladeny legislativní požadavky. Každý materiál musí vyhovovat závazným předpisům platným v čase a v místě budoucí stavby. Závazný předpis může stanovit přípustný, respektive nepřípustný materiál s ohledem na charakter městské rezervace nebo chráněné krajinné oblasti. Zpřísněný pohled na hygienické vlastnosti dříve běžně používaného materiálu může vést i k jeho úplnému zákazu (Svoboda, 2013).

1.2.1 Radioaktivita ve stavebních materiálech

Přirozená radioaktivita stavebních materiálů je vlastnost, která ve větším množství působí škodlivě na lidský organismus. Protože tomuto vlivu nelze vždy zabránit, je třeba alespoň omezit riziko ohrožení zdraví. Radiační působení stavebních materiálů se obvykle posuzuje podle tzv. hmotnostní měrné aktivity, jejíž jednotkou je Bq/kg. Kromě přímého ozáření radioaktivním materiálem dochází k ohrožení zdraví působením látek v ovzduší, konkrétně radonem (Navrátil, 2005; Svoboda, 2013).

1.2.2 Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot

Odpadní materiály jsou ve formě druhotných surovin přínosné z technologického, environmentálního i ekonomického hlediska. Používají se buď jako náhrada primární suroviny, nebo se vnášejí do technologie cíleně, protože mohou zlepšit parametry výsledné stavební hmoty. Například využití některých druhů spalování nebo strusek umožňuje snižovat obsah cementu v betonech, aniž by to negativně ovlivnilo jejich pevnost. Nižší spotřeba slínku pak přispívá ke snižování objemu emisí oxidu uhličitého. Chceme-li při výrobě stavebních hmot využít některý z uvedených odpadních materiálů,

musíme nejprve provést jeho komplexní analýzu. Teprve na jejím základě lze rozhodnout, zda tento materiál můžeme použít jako plnivo, pojivo, či přísadu, popřípadě ho raději nepoužít. Hodnocení technologické i ekologické hmotnosti je nastaveno tak, aby finální produkt mohl být uvolněn na trh v České republice v souladu se současnými legislativními předpisy. Navrhovaná výroba musí být efektivní nejen po ekonomické stránce, ale současně nesmí více negativně ovlivnit životní prostředí, než dosavadní způsob zneškodňování daného odpadu (Lederová, 2008).

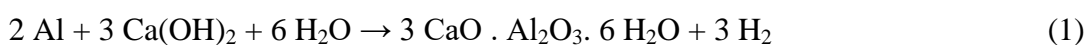
Podle materiálové podstaty a technologie výroby lze stavební hmoty rozdělit na (Svoboda, 2013):

- kamenné výrobky;
- **keramické materiály;**
- výrobky ze skla;
- vápenické výrobky;
- cementářské produkty;
- **autoklávované výrobky;**
- kovové výrobky;
- živičné hmoty;
- plasty;
- výrobky ze dřeva a celulózy;
- ostatní.

Dále se práce bude zabývat pouze autoklávovanými a keramickými výrobky.

1.2.3 Autoklávovaný pórobeton

Pórobeton je nejvýznamnější druh přímo lehčeného betonu. Mezi nejběžněji se vyskytující druhy v České republice patří cihly Ytong a Porfix. Jedná se o anorganický kompozitní materiál obsahující makropóry, které tvoří až 80 % celkového objemu. Je připravován ze surovinové směsi obsahující cement, vápno, písek, kaly z předešlé výroby, vodu a energosádrovec. Pro autoklávované pórobetony se používají všechny druhy cementů na bázi portlandského slínku. Ze speciálních požadavků je důležité, aby cementy určené pro výrobu obsahovaly určité množství alkálií v rozpustné formě, které jsou nutné pro dokonalý vývoj plynu. Součástí je i plynotvorná látka, která po přimísení do výrobní směsi reaguje s alkalickým prostředím a za uvolňování vodíku způsobí nakynutí směsi, jak níže znázorňuje rovnice 1. V České republice se používá hliníkový prášek o minimálním obsahu aktivního hliníku 94 % a specifickém povrchu 700 a 1 200 m²/kg. Prášek nesmí obsahovat slepené hrudky, které mají relativně malý reaktivní povrch.



Sádrovec se používá jako přísada zlepšující pevnost výrobků a regulující tuhnutí směsi. Zpožďuje průběh hašení vápna a jako elektrolyt podporuje vznik thixotropní struktury. Zlepšuje i mrazuvzdornost pórobetonu. Používá se odpadní energosádrovec z odsiřovacích jednotek nebo odpadní chemosádrovec z neutralizačních jednotek různých chemických výroby. Po smíchání všech složek a následném vylití do formy dojde do 15 minut ke zvětšení objemu až 4x, čímž vzniká vysoce porézní materiál. Poté pórobeton tuhne ve zracím poli. Po vyjmutí je materiál odformován a vsazen do autoklávu, kde dochází k hydratačním reakcím, díky kterým se tvoří chemické vazby mezi kyselými a zásaditými složkami. Tím se tvoří nové minerály a dochází k finálnímu vytvrzení směsi. Přítomnost velkého obsahu vzdušných pórů dodává pórobetonu výborné tepelně izolační vlastnosti. Ze stejného důvodu je zdící materiál velmi lehký. Při výrobě pórobetonu nedochází k žádnému spalování a vypouštění škodlivých látek do ovzduší (Pórobeton – kynutý stavební materiál, b.r.; Svoboda, 2013).

Vzhled výrobků je v zásadě dvojitý:

- převážně bílý, je-li jako plnivo použit jemný křemičitý písek (Ytong, pozn. autora);
- v menší míře šedý, pokud je plnivem elektrárenský popílek (Porfix, pozn. autora).

Pro klasifikaci výrobků z pórobetonu se používá především charakteristická minimální pevnost v tlaku (MPa) a maximální průměrná objemová hmotnost v suchém stavu (kg/m^3). Pórobeton se pak označuje číselnou dvojicí složenou z hodnot obou charakteristik (např. P2-500 je pórobeton s minimální charakteristickou tlakovou pevností 2 MPa a maximální průměrnou objemovou hmotností v suchém stavu 500 kg/m^3 (Svoboda, 2013).

Ytong

Je jedním z druhů pórobetonových tvárnic, který se vyrábí výhradně z přírodních surovin jako je písek, vápno, cement a voda. Materiály použité k výrobě cihel tvoří velkou část zemské kůry a jsou díky tomu prakticky nevyčerpatelné. Při výrobě nevznikají škodlivé látky, které by mohly zatížit vzduch, vodu nebo zeminu. Díky příznivé surovinové bilanci šetří suroviny. Z 1 m^3 materiálu se vyrobí asi 5 m^3 pórobetonu. Pórobeton Ytong je vyráběn v uzavřeném cyklu, který vyžaduje menší spotřebu energie než výroba jiných srovnatelných materiálů. (Pórobeton Ytong; b.r.).

Porfix

Dalším druhem autoklávovaného pórobetonu vyráběného na území České republiky je Porfix. Na lepení tvárnic je potřeba pouze minimální množství spojovacího materiálu. Obvodové zdivo z prvků v provedení pero-drážka nevyžaduje ve svislých spárách žádné lepidlo. Stejně rychle se dají zrealizovat rozvody elektřiny a vody. Tvárnice

se vyznačují kombinací konstrukčních a tepelně izolačních vlastností – jsou vhodné i k výstavbě pasivních domů. Při nízkých vstupních nákladech není potřeba stavbu dodatečně zateplovat. Dále také vytváří bariéru proti hluku celého spektra vlnových délek, navíc zvýšené požadavky na zvukovou izolaci se dají řešit v doporučených kombinacích sendvičových stěn příček a jiných materiálů. Rovnoměrnost pórovité struktury zajišťuje shodné termo-fyzikální vlastnosti ve všech směrech tepelného toku materiálem. Tvárnice jsou na dotek pocitově teplé. V létě naopak zabezpečují svou kombinací akumulacních a tepelně-izolačních vlastností ochranu před vnějším sálavým teplem. Snadná opracovatelnost a přesnost má vliv na rychlost a kvalitu výstavby. Porfix se jednoduše řeže, brousí, frézuje i vrtá. Po opracování nevzniká téměř žádný odpad, což přináší značnou úsporu materiálu. Výhodou je rychlá příprava rozvodů ve stěnách i na stropě. Výrobky jsou, díky svému anorganickému minerálnímu původu, také vhodné pro zhotovení protipožárních stěn. Splňují třídu nehořlavého materiálu A1 (Porfix, 2016).

1.2.4 Keramické materiály

K nejstarším přírodním materiálům, které se používaly k výstavbě obytných staveb, patří vedle kamene a dřeva také hlína. Člověk byl hlínou odjakživa obklopen, stavěl z ní jednoduchá a postupně složitější obydlí. Hliněné stavby našly velké rozšíření ve starověkých civilizacích. Stěny z nepálených cihel, vyzděné na kamenné podezdívce, pocházejí z období kolem roku 8 000 př. n. l. U nás, stejně jako v západní Evropě, je užití hlíny jako stavebního materiálu zmiňováno ve 13. až 14. století. Především ve střední a jižní části Moravy se vyskytují mohutná ložiska sprašových hlín a právě zde jsou hliněné stavby pro svou historickou a výtvarnou hodnotu významnou složkou architektonického dědictví. Protipožární a stavební nařízení dala základ k vytvoření stavebních řádů. Tzv. „Ohňový patent“ Marie Terezie z roku 1751 nařizuje, aby kuchyně a komíny byly zděné. V druhé polovině 18. století byla vydána dvorní a guberniální nařízení, která měla napravit vady a nedostatky způsobené přílišnou stavební volností. V roce 1833 byl vydán první stavební řád, který stanovil veškeré

podmínky stavby. Po roce 1870 nastal pokrok při budování zděných konstrukcí spojený se změnou technologie výroby pálených cihel, prudkým rozvojem průmyslu a potřebou výstavby mnoha průmyslových objektů (Chybík, 2009).

Základem výchozí surovinové směsi pro výrobu keramiky jsou plastické horniny obsahující jílovinu. Vytváření může probíhat za různých vlhkostí směsi. Výrobky se pak podle potřeby suší a nakonec se zpevňují vypalováním, čímž vznikne hmota nazývaná keramický střep. V České republice jsou velmi rozšířené cihlářské suroviny obsahující relativně nízké a proměnlivé množství jílových minerálů (kaolinitu, illitu, montmorillonitu, chloritu a jejich smíšených struktur) s převládajícím podílem prachových zrn křemene, slídy a úlomků různých hornin včetně karbonátových. Obsahují také více či méně rozptýlený oxidický pigment železa. Některé druhy jsou doprovázeny i velkými krystaly sádrovice a kalcitu. Jejich plastičnost roste se zvyšujícím se poměrem jílové složky ke složkám neplastickým, zvyšováním měrného povrchu zeminy a iontové výměnné kapacity (Svoboda, 2013).

Velmi důležité je dostatečné odležení čerstvě připravené výrobní směsi v odležovacích věžích. Tím se podstatně zvyšuje rovnoměrné rozdělení vlhkosti ve směsi a její plastičnost. Další úprava směsi často spočívá v jejím propaření a intenzivním zhomogenizování ve šnekovém protlačovacím mísiči. Vlhkost výrobní směsi je asi 19-22 % hmotnosti. Jejím zahřátím párou na teplotu 40 až 45 °C se dále zlepšuje její plastičnost a současně usnadní sušení vytvarovaných těles. Na vakuových šnekových lisech se odstraňuje vzduch z těsta, které se tvaruje v ústí lisu při tlaku 1,5 kPa. Vytvarovaný pás je za lisem odřezáván podle požadované velikosti cihel. Sušení probíhá podle předepsaného režimu z vytvářecí vlhkosti až do vlhkosti 1,0 až 1,5 % hmotnosti ve středu stěny děrované cihly. Suší se při teplotě asi 80 °C po dobu 30 až 35 hodin. Výpal se dnes uskutečňuje zpravidla v tunelových pecích, dříve byly obvyklejší spíše pece kruhové. Běžným palivem je dnes zemní plyn (dříve práškové uhlí nebo mazut). Nakládání cihel je plně automatizováno. Výpal se provádí při teplotě 860 až 950 °C, při které dochází ke slinování. Smrštění cihlářského střepu při výpalu dosahuje 0,5 až 1 % (Svoboda, 2013).

Moderní pecní agregáty jsou doplněny přídavným spalováním kouřových plynů, takže exhalace z takových provozů jsou pod stanovenými emisními limity. Odpadní teplo je využíváno v sušárnách. Podle použití je lze rozdělit na výrobky pro svislé konstrukce, vodorovné konstrukce, výrobky pro skládanou krytinu a pro zvláštní účely. Zděné konstrukce z pálených zdících prvků se průběžně přizpůsobují požadavkům na jejich statické, tepelně a zvukově izolační parametry, na trvanlivost při zachování nároků na estetické vlastnosti (Svoboda, 2013).

Heluz

Typickým stavebním materiálem na našem území jsou po několik desítek let cihly Heluz, vyráběné v cihlárně v Dolním Bukovsku, která byla založena v roce 1876. Rodu Řehořů cihelna patřila až do roku 1950, kdy se stala jedním z výrobních závodů tehdejšího národního podniku Jihočeské cihelny. V sedmdesátých letech minulého století zde byla postavena moderní cihelna, která byla v roce 1992 zprivatizována ve prospěch rodinných příslušníků původních majitelů. Novým majitelem se stal Ing. Vladimír Heluz, který pokračuje ve výrobě cihlářského sortimentu pod názvem HELUZ cihlářský průmysl, v.o.s. (Vše pro Váš dům; b.r.).

Společnost Heluz cihlářský průmysl, v.o.s. je největším českým výrobcem cihelného materiálu. Vůbec první žárová pec byla postavena Janem Řehořem v Dolním Bukovsku, který z vytěžené hlíny vypálil první cihly. Výroba je především zaměřena na cihelné bloky s vysokými tepelně-izolačními parametry (Stavebnictví v obrazech, b.r.; O společnosti heluz, b.r.).

V areálu výroby jsou navezené hromady hlín, ze kterých se prostřednictvím automatických zásobníků a podavačů dopravuje hlína do mísícího zařízení, kde se natěžená zemina drtí a míchá v přesně stanoveném poměru, který je pro každý druh výrobku jiný. Zároveň se přidávají pomocné látky, jako jsou piliny, buničina, popílek, polystyren a jiné. Ty zlepšují vlastnosti cihel, například snižují objemovou hmotnost, zlepšují tepelně izolační vlastnosti nebo snižují energii potřebnou na výpal

cihel. Z mísícího zařízení odchází hlína pomocí jemných válců do lisu. Protlačováním skrz výstupní formu se vytváří souvislý pás vytvarované hmoty. Ten se následně odřezává pomocí ocelové struny a vznikají tak vytvarované syrové cihly. Při změně formy na výrobu cihel se nepovedené výlisky okamžitě ručně vytrídí a znovu se naházejí do zásobníku, ze kterého putují k recyklaci. Nařezané syrové cihly směřují do sušárny, kde se vysušují až jeden den, v závislosti na konkrétním druhu výrobku. Sušárenské komory jsou v řadě po celé délce výrobní haly. Výška vrat u každé komory dosahuje výšky patrového domu. Automatický překladač navrství cihly na pecní vozy na kolejkách. Cihly se vyskládají na šamotové tvarovky a jsou odváženy na pecních vozech do pece k výpalu. Vypalovat se začíná při 160 °C. Cihlářská pec je srdcem výrobní haly. Na první pohled je to cihlová zeď vedoucí přes celou výrobní halu – má bezmála 100 m. Teplota se během průchodu cihel v každém úseku cihlářské pece mění. V posledním úseku se cihly ochlazují, aby po vyjetí z pece nepukly. Poté se nakládají na dopravník, který má výhybku. Vlevo jsou transportovány cihly přímo na paletu, vpravo do brusírny. Bruska má dva v průměru metrové brusné kotouče, mezi kterými jsou cihly protaženy a broušeny. Vzápětí se linka opět sbíhá a cihly jsou dopravovány na palety, dále ven z haly na expediční dvůr, odkud jsou převáženy do stavebnin nebo přímo k zákazníkovi (Stavebnictví v obrazech, b.r.).

Pálená cihla

Dalším druhem stavebního materiálu je klasická pálená cihla. Jak již bylo zmíněno výše v textu, cihly jsou používány přibližně od mladší doby kamenné. Jednalo se však ještě o cihly nepálené (tzv. vepřovice). Pálené cihly se objevily až kolem roku 3 000 př. n. l. v Mezopotámii. Avšak kvůli vysoké ceně se využívaly pouze ke zvláštním účelům, například jako vnější zdi paláců. Teprve až vynález kruhové pece v druhé polovině 19. století umožnil masovou výrobu pálených cihel. Původní pěstování hlíny do forem bylo nahrazeno automatickým procesem s vytlačovacími stroji a s mísením hlíny ve velkých objemech. Středem cihelny je kruhová pec. Výpal vyžaduje přítomnost

obsluhy, která má dlouholeté zkušenosti, patřičnou dovednost při sledování a řízení celého procesu.

Hlína se buldozerem přihrnuje ke korečkovému těžebnímu stroji a ten ji dopraví po běžících pásích do výrobní budovy k prvnímu zvlhčovacímu mísiči, kde se hlína pasíruje přes síta. Následně se pásem dopraví do válcovacího stroje, který třením zajišťuje dokonalou homogenitu hlíny a zbavuje ji hrudek. Protřená hlína se poté podává dopravníkem do vytlačovacího stroje, který plastický materiál formuje do nekonečného pásu. Z tohoto pásu hmoty jsou ocelovou strunou odsekávány jednotlivé kusy v surovém stavu, které jsou odebírány pořadačem a skládány na police. Následně jsou odváženy k volnoprostorovému sušení a v případě nevhodných klimatických podmínek do vytápěných sušáren. Po vysušení jsou naváženy do kruhové pece a vypáleny. Po vychladnutí se vypálené cihly třídí a ukládají na palety, kde jsou zapáskovány, a tím jsou připravené k expedici (Cihly a cihlářství, b.r.).

2 CÍL PRÁCE A VÝZKUMNÁ OTÁZKA

2.1 Cíl práce

Cílem práce je porovnání chemického a mineralogického složení různých druhů cihel v závislosti na obsahu radonu.

2.2 Výzkumná otázka

Na základě stanoveného cíle byla formulována následující výzkumná otázka: Je obsah radonu závislý na složení stavebního materiálu?

3 METODIKA VÝZKUMU

V teoretické části bakalářské práce bylo poukázáno na obsah radonu v obydlích jako na velký problém především v České republice. Dále byly rozebrány dceřiné produkty radonu, výskytu radonu ve světě a vliv radonu na lidské zdraví. Na základě zkoumání odborné literatury a v rámci prostudování nejčastěji používaných cihel ke stavbě rodinných a bytových domů bylo rozhodnuto o odebrání reprezentativních vzorků pro experimentální část práce. Byly použity běžně dostupné cihly firmy Ytong P4-500 hladká vyrobené v Xella CZ s.r.o., Porfix P2-500 hladká vyrobené v Porfix cz a.s., dále byly analyzovány cihly výrobce Heluz cihlářský průmysl, v.o.s. Heluz 11,5 broušená a také klasická plná pálená cihla odebraná jako historický materiál z klášterní zdi v Nové Říši.

V Tabulce 1 nalezneme seznam odebraných vzorků. Cihly byly nakoupeny ve stavebninách. Vzorky plné cihly byly odebrány z klášterní zdi v Nové Říši.

- | | | | |
|-----------|------------|-----------|----------------|
| • ytong 1 | • porfix 1 | • heluz 1 | • plná cihla 1 |
| • ytong 2 | • porfix 2 | • heluz 2 | • plná cihla 2 |
| • ytong 3 | • porfix 3 | • heluz 3 | • plná cihla 3 |

Tabulka 1: Vzorky cihel odebrané k analýze, zdroj: autor

Pro chemickou analýzu byla zvolena metoda opticko-emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (OES-ICP), která sleduje emisi elektromagnetického záření volnými atomy látek v plynném stavu a mineralogická analýza byla stanovena pomocí rentgenové práškové difrakce (XRD). Obsah radonu ve stavebním materiálu byl měřen nepřímo, a to pomocí gamaspektrometrické analýzy hmotnostních aktivit nejčastěji sledovaných radioaktivních izotopů ^{40}K , ^{226}Ra a ^{232}Th , přičemž se vznikem radonu souvisí pouze výskyt ^{226}Ra a ^{232}Th , protože přeměnou ^{40}K vznikají vápník ^{40}Ca a argon ^{40}Ar . Oba tyto dceřiné izotopy jsou stabilní, další rozpad již nepokračuje. Byl vypočítán index hmotnostní aktivity, který byl porovnán s certifikovanou hodnotou. Vzorky byly

nafočeny a jsou uvedeny v Příloze A. Výsledky byly zpracovány do tabulek. Dále byly vytvořeny grafy porovnávající obsah jednotlivých prvků, minerálů a radioaktivních izotopů. Poté byly naměřené hodnoty porovnány s odbornými články a zodpovězena výzkumná otázka.

3.1 Úprava vzorků cihel

Pro potřeby správného měření byly vzorky materiálu odebrané z jedné zásilky. O každém vzorku byl pořízen záznam obsahující informace o výrobci, označení materiálu a datum odběru vzorku. Pro lepší přehled byly zkoumané vzorky rozděleny do dvou skupin. Vzorky cihel Ytong a Porfix jsou vyrobeny z lehčeného pórobetonu, proto byly zařazeny do skupiny 1. Cihly Heluz a pálená cihla spadají pod keramické výrobky a byly zařazeny do skupiny 2. Každý vzorek byl zvlášť rozbit na malé kousky a poté namlet ve hmoždírovém mlýnu (Obrázek 2). Vzorky pro chemickou a mineralogickou analýzu byly nafočeny a jsou uvedeny v Příloze C.



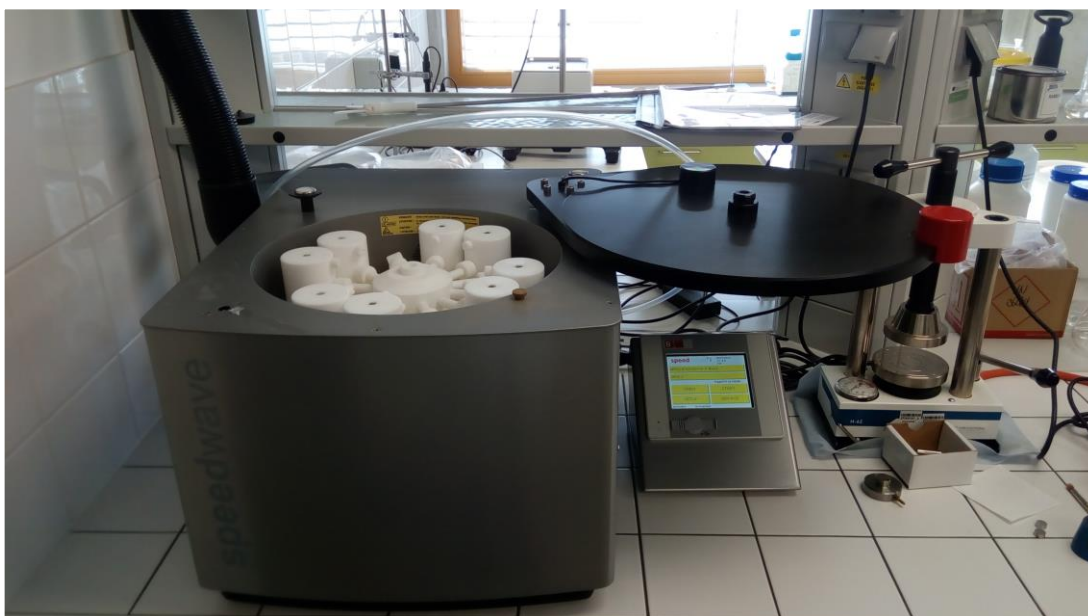
Obrázek 2: Hmoždírový mlýn Retsch, zdroj: autor

3.1.1 Úprava vzorků pro gamaspektrometrickou analýzu

Odebrané vzorky byly vysušeny do konstantní hmotnosti. Dále byly rozbity na malé kousky a rozemlety v hmoždírovém mlýnu na velikost do 1 mm. Přibližně 0,5 kg vzorku bylo převedeno do Marinelliho nádob a zváženo. Vzorky byly nafoceny a jsou uvedeny v Příloze B.

3.1.2 Úprava vzorků pro chemickou analýzu

Vzorky byly vysušeny do konstantní hmotnosti, naváženy na analytických vahách na čtyři desetinná místa a kvantitativně převedeny do teflonových rozkladných nádob pro mikrovlnný rozklad na přístroji Berghof SW 4 (Obrázek 3). Ke vzorkům bylo přidáno 7 ml kyseliny chlorovodíkové. Vzorek byl zfiltrován přes filtrační papír Munktell filtrak (grade 292) a kvantitativně převeden do 50 ml odměrné baňky, která byla doplněna po rysku deionizovanou vodou.



Obrázek 3: Mikrovlnný rozklad Berghof SW 4, zdroj: autor

3.1.3 Úprava vzorků pro mineralogickou analýzu

Reprezentativní vzorky byly vysušeny do konstantní hmotnosti, rozemlety ve vibračním mlýnku a rozetřeny v achátové misce pod 0,063 μm . Poté byly uloženy do speciálního nosiče, který byl vložen do přístroje, a bylo provedeno vlastní měření.

3.2 Měření vzorků cihel

Pro správné posouzení závislosti obsahu radonu na stavebním materiálu bylo nezbytné provést chemickou a mineralogickou analýzu a také změřit aktivitu radonu. Chemická analýza byla provedena na OES-ICP a mineralogická analýza byla stanovena na XRD. Radon byl stanoven nepřímo, pomocí gamaspektrometrické analýzy na polovodičové gamaspektrometrii, která měří hmotnostní aktivitu ^{40}K , ^{226}Ra a ^{232}Th , přičemž vliv na množství radonu má pouze radium a thorium.

3.2.1 Gamaspektrometrická analýza

Ionizující záření je okem neviditelné, abychom se mohli o jeho existenci přesvědčit, musíme jej detekovat pomocí fyzikálních metod a vhodných přístrojů. Kromě toho detekce poskytuje kvantitativní informace o intenzitě, energii, prostorové distribuci a dalších vlastnostech záření. Radiometrické přístroje a měřící metody jsou založeny na vlastnostech ionizujícího záření a jeho interakcích s hmotným prostředím. V detektoru se mění energie dopadajícího ionizujícího záření na elektrický signál, který se zpracovává tak, aby mohl být zaregistrován a vyhodnocen (Švec, 2005; Ullmann, b.r.).

Hmotnostní aktivita ^{40}K , ^{226}Ra a ^{232}Th a index hmotnostní aktivity byl stanoven spektrometrií gama s polovodičovým detektorem HPGe GC4519 Canberra. Metoda je založená na principu měření relativní intenzity skupin fotonů vyzařovaných jedním jádrem, které se ve spektru zobrazí jako píky. Energie záření určuje polohu píku a intenzita udává plochu pod píkem a jeho výšku. Po stanovení indexu hmotnostní

aktivity, který se dle nově platné vyhlášky (vyhl. č. 422/2016, § 102 odst. 4) rovná 1, bylo vyhodnoceno, že jednotlivé typy stavebních materiálů byly vyrobeny z homogenní směsi, a již není nutné měřit mineralogické složení u všech vzorků. Výjimku tvoří pouze klasická pálená cihla odebraná z klášterní zdi v Nové Říši. Zde byl vzorek 1 a 3 shodný, avšak vzorek číslo 2 se lišil, proto byly na rentgenové práškové difrakci změřeny vzorky „plná cihla 1“ a „plná cihla 2“ a dále také po jednom vzorku z jednotlivých druhů cihel. Měření bylo provedeno na SÚJB Mgr. Jiřím Havránkem.

Měření vzorků ve stavebním materiálu

Systematické měření vzorků a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu mohou provádět pouze měřící laboratoře, které mají pro tuto činnost povolení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Měření každého vzorku zahrnuje stanovení hmotnostních radionuklidů ^{40}K , ^{226}Ra a ^{228}Th a výpočet indexu hmotnostní aktivity. Měřící zařízení používaná pro uvedený účel jsou stanovenými měřidly ve smyslu zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů, a podléhají pravidelnému metrologickému ověřování (Petrová, 2009).

Ke stanovení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu se používají metody scintilační nebo polovodičové spektrometrie gama. V České republice nejsou k dispozici normalizované postupy. V případě polovodičové spektrometrie gama je možno vycházet z ČSN ISO 10703, případně z návodů výrobce k používání měřících zařízení a vyhodnocovacích programů. Metody používané pro systematické měření musí být v přiměřeném rozsahu validovány včetně ověření správnosti měření formou mezilaboratorního porovnání a předloženy Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) k vyjádření v rámci povolovacího procesu. Mezi detekce se rozumí nejmenší detekovatelná hmotnostní aktivita stanovená na hladině významnosti 95 % ($\alpha = \beta = 0,05$). Nejistotou se rozumí relativní kombinovaná standardní nejistota při hodnotě hmotnostní aktivity rovné nebo vyšší než trojnásobek v tabulce uvedené meze detekce (Petrová, 2009).

Spektrometrie gama s detektorem ze superčistého germania

Pro stanovení obsahu radionuklidů ve stavebních materiálech byla použita polovodičová gamaspektrometrie. Jejím úkolem je určování energií fotonů gama, které radionuklidy vyzařují. Také se získávají informace o relativních intenzitách skupin fotonů vyzařovaných jedním jádrem, které se ve spektru zobrazují jako příslušné píky. Energie záření určuje polohu píku na vodorovné energetické ose spektra, intenzita udává plochu pod píkem a jeho výšku. Gama záření se od toho rentgenového liší tím, že pochází z jádra. Energie fotonů je v rozmezí řádově od desítek keV až po jednotky MeV. Záření gama je ionizující záření pronikavější než α a β (Kroupa, b.r.).

Polovodičové detektory jsou zhotoveny většinou z monokrystalů germania, buď se stopovým množstvím lithia, tzv. drift – detektory Ge(Li) nebo častěji ze superčistého germania HPGe (z anglického *High Purity Germanium*). Polovodičové spektrometrické detektory potřebují pro svou správnou funkci chlazení, které probíhá na teplotu kapalného dusíku z důvodu snížení závěrného proudu a elektronického šumu. U detektorů pro nízké energie bývá často chlazen i předzesilovač, jehož vstupní prvek – tranzistor řízený polem – je umístěn v kryostatu společně s detektorem, aby byl co nejvíce omezen šum předzesilovače. HPGe detektory využívají elektronický chladičový systém pracující na základě Joule-Thomsonovy expanze stlačeného plynu (mimo dusíku se používá i hélium či jiné kryogenní plyny). S miniaturizovaným kompresorem se Stirlingovým cyklem a případně také Peltierovým termočlánkem již není potřeba používat kapalný dusík dolévaný do Dewarovy nádoby. Výhodou těchto detektorů je možnost tepelného cyklování. Princip spočívá v tom, že se detektor při měření ochladí na teplotu kapalného dusíku, ale skladován může být při pokojové teplotě (Ulmann, b.r.).

3.2.2 Chemická analýza

Pro chemickou analýzu byla použita metoda OES-ICP (Obrázek 4). Po převedení do roztoku byl vzorek vnesen pomocí peristaltického čerpadla do zmlžovače, kde vznikl aerosol, který dále putoval v proudu argonu do plazmatu, jehož energie je dostatečná k tomu, aby došlo k excitaci elektronů do vyšších energetických hladin. Tento stav je nestabilní, vybuzené elektrony se vrací zpět na původní energetickou hladinu a přitom emitují záření o vlnové délce, která je pro daný prvek charakteristická. Touto metodou byla změřena koncentrace oxidů vápníku, železa, draslíku, hořčíku, sodíku, fosforu, síry a titanu v hmotnostních procentech u 12 vzorků cihel v Centru Excellence Telč.



Obrázek 4: Opticko-emisní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem, zdroj: autor

OES-ICP je jednou z nejzajímavějších technik instrumentální elementární analýzy. Může být použita ke stanovení více jak sedmdesáti prvků v různých maticích kyselin. Používá se v mnoha různých aplikacích. Je založena na sledování emise elektromagnetického záření volnými atomy látek v plynném stavu. Přístroj se skládá z plazmového zdroje, optického systému, detektoru CCD a zmlžovače roztoků (Klouda, 2003; Nölte, 2003).

Plazmový zdroj

Dodává energii potřebnou pro vyvolání emise záření atomy vzorku. Dovoluje analyzovat vzorky v roztoku. Vzorek převádí do plynného stavu, ve kterém nastane excitace elektronů. Plazma vzniká působením vysokofrekvenčního elektromagnetického pole za pomoci indukční cívky v prostředí argonu. Její teplota dosahuje 6 000–10 000 K. Do ní je pomocí peristaltického čerpadla vnášen zmlžený roztok vzorku v argonu. Plazmový hořák je z taveného křemene a je chlazen argonem popř. dusíkem. Plazmový zdroj umožňuje stanovení velmi malých i nekovových materiálů s vysokou citlivostí, který je nejrozšířenějším zdrojem (Klouta, 2003).

Optický systém

Optický spektrometr rozkládá záření budícího zdroje na jednotlivé spektrální čáry a měří jejich intenzitu. Nároky na oddělení čar jsou velmi vysoké, může být požadováno rozlišení čar vzdálených setiny nanometrů. Vstupní štěrba je široká asi 1 μm a omezuje šířku vstupujícího záření. Mřížka je zhotovena ze speciálního keramického materiálu s téměř nulovým koeficientem roztažnosti. Záření jednotlivých vlnových délek dopadá na výstupní štěrbinu, za kterou je měřena jeho intenzita. Simultánní optické emisní spektrometry měří současně několik spektrálních čar. Obsahují tolik výstupních štěrbin nastavených na spektrální čáry prvků a tolik fotonásobičů, kolik prvků na spektrometru chceme měřit. Místo o monochromátoru hovoříme o polychromátoru. Můžeme měřit až několik desítek prvků najednou (Klouta, 2003).

Detektor CCD

Je křemíkový polovodičový čip, který obsahuje diskrétní čtvercové fotocitlivé jednotky (pixely) o šířce 10–30 μm . Každý pixel má citlivost fotonásobiče. Činnost můžeme zjednodušeně popsat takto: dopad fotonu na vstupní část generuje elektron, který je uchován v „potenciálové jámě“ těsně pod povrchem, kde je obsažen oxid křemičitý.

Počet nábojů v jámě kumulativně narůstá s množstvím fotonů dopadajících na povrch, tedy větší osvětlení značí větší náboj. Přenosovou částí je náboj postupně přenášen pomocí elektrického pole k výstupní části, ze které elektrony projdou na zesilovač čipu. Poté je individuální náboj pixelu konvertován na výstupní napětí (Klouda, 2003).

Zmlžování roztoků

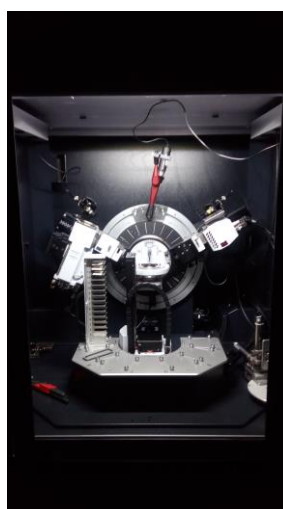
V tzv. zmlžovači dochází ke vzniku aerosolu. Roztok je do zmlžovače přiváděn peristaltickým čerpadlem, s jehož pomocí je zajištěn konstantní průtok vzorku. Rychlost průtoku ovlivňuje intenzitu signálu a rychlost vymývání vzorku ze zmlžovače a mlžné komory. Peristaltické pumpy jsou vyrobeny z řady válců, které posouvají roztok pomocí hadiček. Ty jsou zpravidla sestaveny pro slabě kyselé roztoky. Poškozené hadičky způsobují snížení výkonu čerpadla a mohou negativně ovlivnit výsledek. Problému lze předcházet propláchnutím hadiček po skončení analýzy a jejich uvolněním z čerpadla při nepoužívání přístroje (Kurz ICP spektrometrie, 2009).

Vliv minerálních kyselin

Funkce zmlžovače je ovlivněna fyzikálními vlastnostmi kapaliny (hustota, povrchové napětí, viskozita). Účinnost vnášení analytu do plazmatu, procesy v plazmatu a citlivost měření ovlivňuje velikost kapének. Nejvíce patrné efekty změn ve fyzikálních vlastnostech jsou při použití roztoků kyseliny fosforečné a sírové. Peristaltické čerpadlo není schopno překonat následky měnící se hustoty. Problém s plazmovými interferencemi lze řešit přidávkem kyseliny či organické sloučeniny o nízké koncentraci (Sommer, 1992).

3.2.3 Mineralogická analýza

Mineralogické složení bylo stanoveno pomocí XRD (Obrázek 5). Principem metody je dopad rentgenového záření na hmotu. Elektrony v obalech se rozkmitají s frekvencí odpovídající vlnové délce záření. Stávají se tak zdrojem rentgenového záření, které se od nich odráží všemi směry. Tento jev se nazývá difrakce. Dochází k zesílení rozptýleného rentgenového záření v určitých směrech. Měření bylo provedeno na 5 vzorcích Albertem Vianim, Ph.D. v Centru Excellence Telč.



Obrázek 5: Rentgenová difrakční analýza, zdroj: autor

XRD je vyspělá, nedestruktivní technika, využívaná k analýze širokého spektra materiálů, jako jsou například tekutiny, kovy, minerály, polymery, plasty, farmaceutika, keramické materiály, polovodiče a jiné. Příklady aplikací zahrnují kvalitativní a kvantitativní fázovou identifikaci, zkoumání textury a zbytkového napětí, nanomateriály, laboratorní a procesní automatizaci, vysokokapacitní screening polymorfů a také krystalografii (Společnost Bruker s.r.o., b.r.).

Při dopadu rentgenového záření na hmotu se elektrony v obalech atomů rozkmitají s frekvencí odpovídající vlnové délce záření. Tyto kmitající elektrony se stávají

zdrojem sekundárního rentgenového záření, které se od nich odráží všemi směry. Důsledkem interference těchto parciálních vlnění bývá zesílení rozptýleného rentgenového záření v určitých diskrétních směrech a zrušení v ostatních. Tento jev se označuje termínem difrakce, paprsky zesíleného záření se nazývají pojmem reflexe. Děj probíhá za jistých geometrických podmínek mezi svazkem dopadajícího rentgenového záření a orientací struktury krystalu. Tyto podmínky lze vyjádřit dvěma způsoby: Braggovou rovnicí nebo soustavou tří Laueho rovnic. Oba způsoby popisují stejný jev a lze matematicky dokázat, že jsou vzájemně ekvivalentní (Muzeum; b.r.).

Braggova rovnice – popisuje difrakci jako odraz rentgenového záření na strukturních rovinách krystalu. Je to svazek rovnoběžných paprsků o vlnové délce l , který dopadá pod úhlem Q (theta) na osnovu mřížkových rovin vzdálených od sebe o hodnotu d . Difraktované záření se odráží od osnovy rovin pod stejným úhlem Q . K difrakci dochází, když se paprsek odražený od jedné roviny zpozdí vůči paprsku odraženému z vedlejší roviny o celý násobek jeho vlnové délky l .

To je splněno, když platí Braggova rovnice (2):

$$2d \cdot \sin \Theta = n \cdot \lambda \quad (2)$$

kde: d – mezirovinná vzdálenost [\AA]; Θ – difrakční úhel (theta); n – celé číslo vyjadřující, o kolik násobků vlnové délky je jeden paprsek vůči druhému zpožděn (řád interference resp. difrakce); λ – vlnová délka rentgenového záření [\AA].

Při rentgenometrickém studiu krystalů se obvykle používá monochromatické záření, takže l je konstanta. Mezirovinné vzdálenosti d ve strukturách krystalů jsou rovněž konstantní. Při otáčení krystalem dochází k difrakci na jednotlivých souborech strukturních rovin pod příslušným úhlem. Pokud tento úhel známe, můžeme vypočítat mezirovinnou vzdálenost příslušné osnovy rovin (Muzeum; b.r.).

Laueho rovnice – je druhou možností popisu difrakce rentgenového záření na krystalech. Difrakci si představujeme jako ohyb záření na trojrozměrné mřížce. Představme si svazek paprsků rentgenového záření s vlnovou délkou l , který dopadá

na řadu stejně vzdálených atomů pod úhlem α_0 . Jednotlivá parciální záření spolu interferují, takže v některých směrech dojde k zesílení záření. Tyto směry jsou rozloženy na povrchu souosých kuželů, jejichž osou je řada atomů, na niž k difrakci dochází, a které mají vrcholový úhel a .

Kužely lze popsat rovnicí (3):

$$a(\cos \alpha - \cos \alpha_0) = h \cdot \lambda \quad (3)$$

kde: a – velikost vektoru charakterizujícího směr řady atomů a vzdálenost mezi nimi;
 α – vrcholový úhel difrakčního kužele; α_0 – úhel dopadu rentgenového záření; h – celé číslo; λ – vlnová délka rentgenového záření.

Krystalová struktura je trojrozměrná. Proto musí být takové podmínky tři, aby každá popisovala periodicitu krystalu v jednom rozměru. K difrakci dochází pouze tehdy, jsou-li splněny všechny tři podmínky současně. Pomocí Laueho rovnic lze ukázat, proč má difraktované záření charakter svazku rovnoběžných paprsků: difraktovaný svazek se šíří směrem, v němž se současně protínají všechny tři kužely.

Laueho rovnice:

$$a(\cos \alpha - \cos \alpha_0) = h \cdot \lambda$$

$$b(\cos \beta - \cos \beta_0) = k \cdot \lambda$$

$$c(\cos \gamma - \cos \gamma_0) = l \cdot \lambda$$

Symboly h, k, l se rovnají Millerovým indexům osnov mřížkových rovin hkl násobeným řádem difrakce (Muzeum; b.r.).

Zdroje rentgenového záření

K rentgenometrickým experimentům je třeba získat vhodné rentgenové záření. Nejčastěji se používá monochromatické záření o vlnové délce 0,5–2,5 Å. Takové záření vzniká při dopadu vysoce urychlených elektronů na atomy hmoty. Na tomto principu

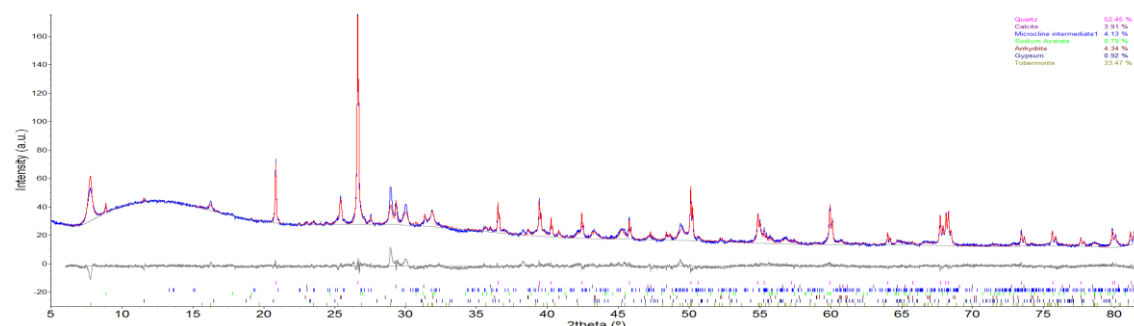
pracují rentgenové lampy, tzv. rentgenky, což jsou v podstatě vakuované skleněné trubice se dvěma zatavenými elektrodami, mezi kterými je vysoké napětí. Jako katoda slouží wolframové vlákno rozžhavené na velmi vysokou teplotu. Katoda produkuje elektrony, které jsou urychlovány v elektrickém poli a s velkou energií dopadají na anodu. Každá rentgenka poskytuje záření se dvěma složkami – spojitou a charakteristickou. Spojitá složka vzniká při zabrzdění elektronů na atomech anody. Při srážkách s atomy ztrácejí elektrony vždy část své kinetické energie, která se mění na rentgenové záření s postupně rostoucí vlnovou délkou. Proto je spojitě záření polychromatické. Oproti tomu charakteristické záření se vyznačuje přesně určenými vlnovými délkami. Na rozdíl od spojitěho záření závisí jeho vlnová délka na složení anody: čím větší je protonové číslo kovu, z něhož je anoda vyrobena, tím je vlnová délka charakteristického záření menší. Nejčastěji se používají kovy jako chrom, železo, měď, molybden, kobalt, nikl nebo stříbro (Muzeum; b.r.).

Difraktometrická metoda

V praxi je dnes nejrozšířenější metodou k identifikaci minerálů a ke zjišťování jejich mřížkových parametrů. Existuje celá řada typů difraktometrů různé konstrukce. Práškový vzorek je nalepen na povrchu rovinného sklíčka, nebo speciálního nosiče, a umístěn ve středu difraktometru. Monochromatické rentgenové záření dopadá na monochromátor a sadou clonek je soustředováno na preparát, kde dochází k difrakci. Záznam difraktovaného záření se provádí bodovým detektorem, který se pohybuje po kružnici kolem vzorku. Vzorek se otáčí současně s detektorem, ale poloviční úhlovou rychlostí. Díky bodovému detektoru lze měřit intenzitu difraktovaného paprsku pouze v jednom bodě. Potom se detektor o malý kousek posune, zastaví a opět po určité době měří. Impulsy zaznamenané detektorem jsou zapsané buď graficky, nebo digitálně. Výsledný záznam se nazývá difraktogram (Obrázek 6) (Muzeum; b.r.).

Jde o graf, na jehož horizontální ose je vynesena difrakční úhel Φ (resp. jeho dvojnásobek 2Φ) a na vertikální ose intenzita registrovaného rentgenového záření.

Křivka tedy zobrazuje intenzitu registrovaného záření v určitém rozpětí hodnot úhlu 2Φ . Většinou je intenzita nízká, tzv. pozadí. V některých místech křivka prudce roste, dosahuje maxima a opět prudce klesá. Maxima se označují jako píky a odpovídají úhlům, při nichž prudce roste intenzita difraktovaného záření (dochází k difrakci).



Obrázek 6: Difraktogram vzorku Ytong 1, zdroj: autor

Jednotlivé píky tedy odpovídají difrakčním liniím na debyeogramu. Směrem k vyšším difrakčním úhlům lze pozorovat „rozštěpení“ píků na dvojice, které odpovídají difrakcím čar $K\alpha_1$ $K\alpha_2$. Zatímco v debyeogramu jsou zaznamenány relativně velké části difrakčních kuželů, difraktogram je vlastně jednorozměrným „řezem“ difrakčního obrazu. Informace v něm obsažená je ale stejná jako informace obsažená v debyeogramu. Intenzita difrakcí se určí z relativní výšky píků od pozadí k vrcholu. Intenzitu nejvyššího píku označujeme jako 100. Intenzity ostatních píků se určí podle jejich relativní výšky vůči nejvyššímu píku. Má-li nějaký pík poloviční výšku než nejvyšší pík, je intenzita příslušné reflexe 50. U moderních přístrojů je běžný digitální záznam. Numericky zaznamenává přímo intenzitu difraktovaného záření v jednotlivých bodech. Výhodou digitálního záznamu je, že jej lze zpracovávat pomocí programů na počítačích. Hlavní výhodou difraktometrů oproti ostatním práškovým metodám je zjednodušení, zrychlení a především zpřesnění vlastního měření i vyhodnocení záznamu. Nevýhodou může naopak být potřeba většího množství vzorku k měření (Muzeum; b.r.).

Práškové metody

Fungují na principu difraktometrické metody, avšak práškové metody slouží ke zkoumání materiálu ve formě prášku, který je složen z velkého množství různě orientovaných malých krystalků. Tyto krystaly zauímají různé polohy vzhledem k dopadajícímu záření a v každém okamžiku jsou některé z nich orientovány tak, že je pro některou osnovu mřížových rovin splněna Braggova rovnice.

Pravděpodobnost splnění Braggovy rovnice se může dále zvyšovat otáčením vzorku. K difrakci dojde vždy, když nějaká osnova mřížkových rovin svírá s dopadajícím paprskem Braggův úhel. Různě orientované krystaly budou difraktovat do různých směrů, paprsky záření difraktovaného od jedné osnovy rovin se tedy budou šířit po povrchu kužele. Práškové metody mají v mineralogii velký význam právě proto, že u většiny minerálů je obtížné nebo i nemožné získat kvalitní krystal pro výzkum monokrystalovými metodami a výzkum jeho prášku je pak jedinou možností, jak získat alespoň základní strukturní informace (Muzeum; b.r.).

4 VÝSLEDKY

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky jednotlivých stanovení. Bylo provedeno srovnání draslíku, železa a vápníku z chemické analýzy. Byl vytvořen obrázek koncentrací minerálů živců, tobermoritu a křemene. Také bylo vytvořeno porovnání hmotnostních aktivit radia a thoria, a srovnání indexu hmotnostních aktivit s certifikovanou hodnotou.

4.1 Výsledky gamaspektrometrické analýzy

Pro stanovení hmotnostní aktivity byla použita metoda polovodičové spektrometrie gama. V Tabulce 2 jsou uvedeny výsledky hmotnostních aktivit a indexů hmotnostních aktivit jednotlivých vzorků. Z tabulky vyplývá, že asi 3x vyšší hodnoty hmotnostních aktivit, a tím i indexů hmotnostních aktivit, mají keramické materiály.

POLOVODIČOVÁ GAMA SPEKTROMETRIE

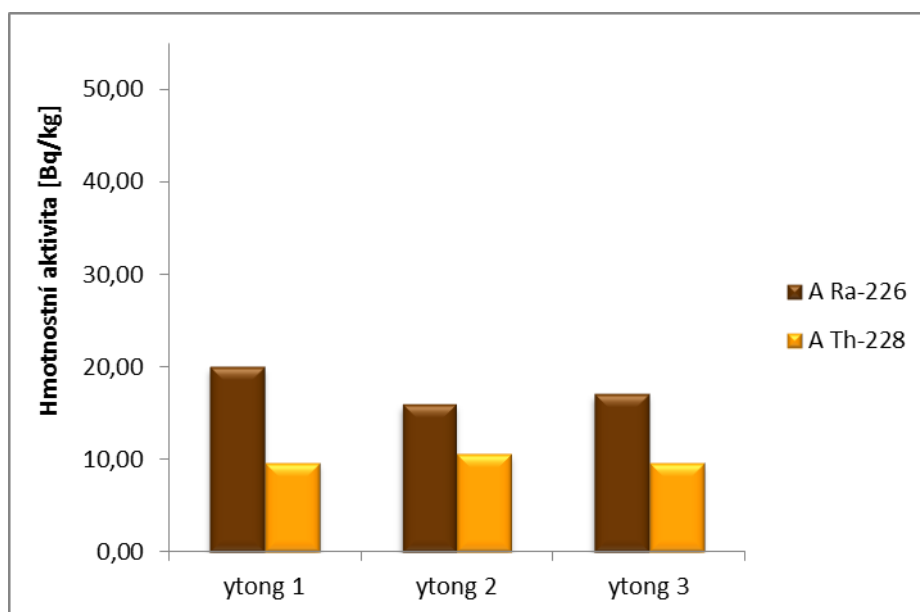
název vzorku		ytong 1	ytong 2	ytong 3	porfix 1	porfix 2	porfix 3
výrobce		Xella CZ s.r.o.			Porfix cz a.s.		
datum odběru		23.12.2016			4.1.2017		
navážka	[g]	374,7	374,47	355,55	483,96	475,55	432,23
A_{K-40}	[Bq/kg]	260,00	285,00	281,00	287,00	295,00	294,00
A_{Ra-226}	[Bq/kg]	19,90	15,90	17,00	16,90	12,25	14,70
A_{Th-228}	[Bq/kg]	9,56	10,51	9,46	5,95	6,97	5,86
index hmotnostní aktivity		0,20	0,20	0,20	0,18	0,17	0,18

POLOVODIČOVÁ GAMA SPEKTROMETRIE

název vzorku		heluz 1	heluz 2	heluz 3	plná cihla 1	plná cihla 2	plná cihla 3
výrobce		HELUZ cihlářský průmysl v.o.s.			neznámý		
datum odběru		25.11.2016			2.1.2017		
navážka	[g]	630,49	580,85	670,16	557,12	615,25	592,91
A_{K-40}	[Bq/kg]	789,00	826,00	776,00	657,00	658,00	568,00
A_{Ra-226}	[Bq/kg]	38,20	41,20	37,60	52,70	38,00	50,75
A_{Th-228}	[Bq/kg]	26,55	32,95	30,55	37,75	27,85	45,25
index hmotnostní aktivity		0,52	0,58	0,54	0,58	0,49	0,59

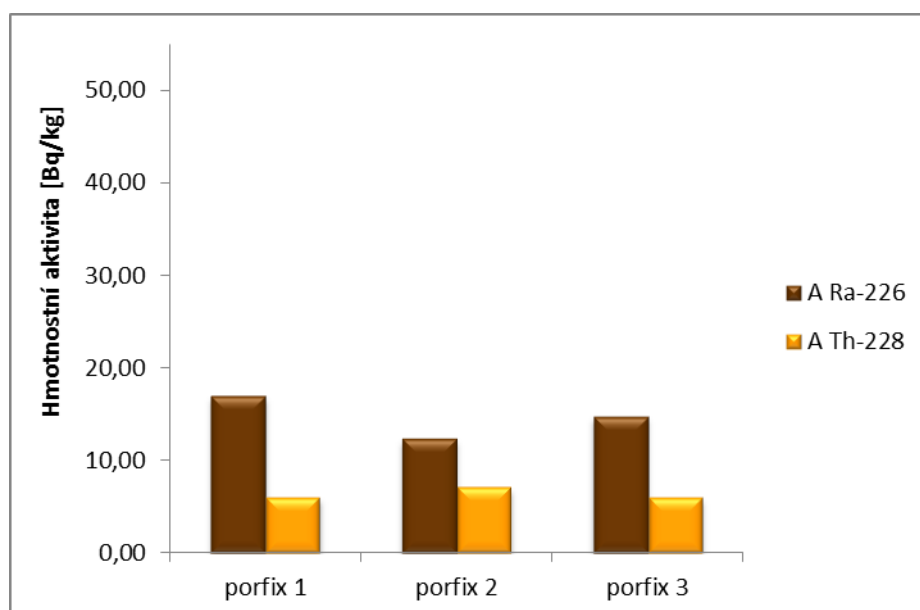
Tabulka 2: Index hmotnostní aktivity stavebních hmot, zdroj: autor

Na obrázcích 7, 8, 9 a 10 jsou znázorněny hmotnostní aktivity radia a thoria jednotlivých vzorků. Z obrázku 7 je patrné, že Ytong má hmotnostní aktivitu radia přibližně 17 Bq/kg a thoria 10 Bq/kg.



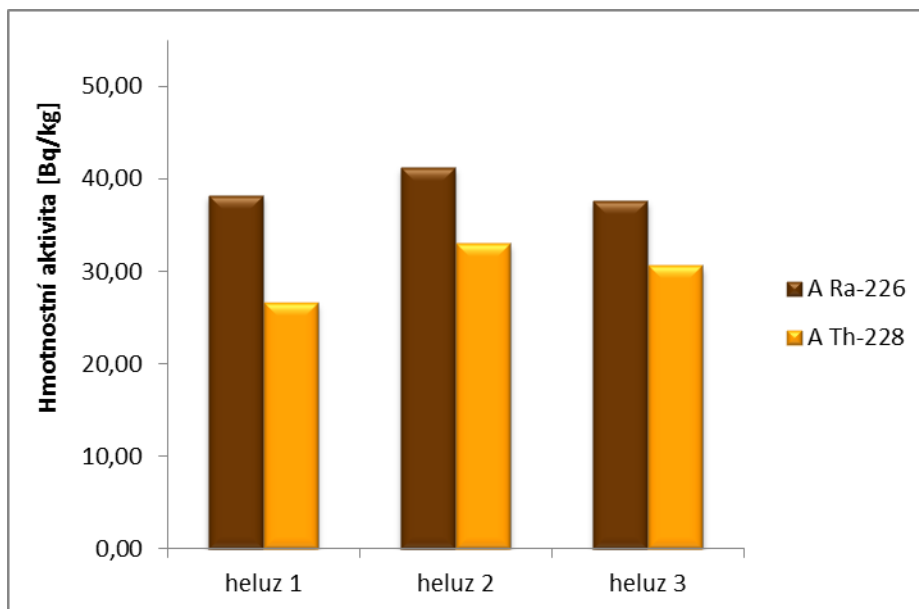
Obrázek 7: Hmotnostní aktivita vzorků Ytong, zdroj: autor

Obrázek 8 znázorňuje hmotnostní aktivitu radia a thoria vzorků Porfix. Je vidět hmotnostní aktivitu radia, která je zhruba 14 Bq/kg a thoria 6 Bq/kg.



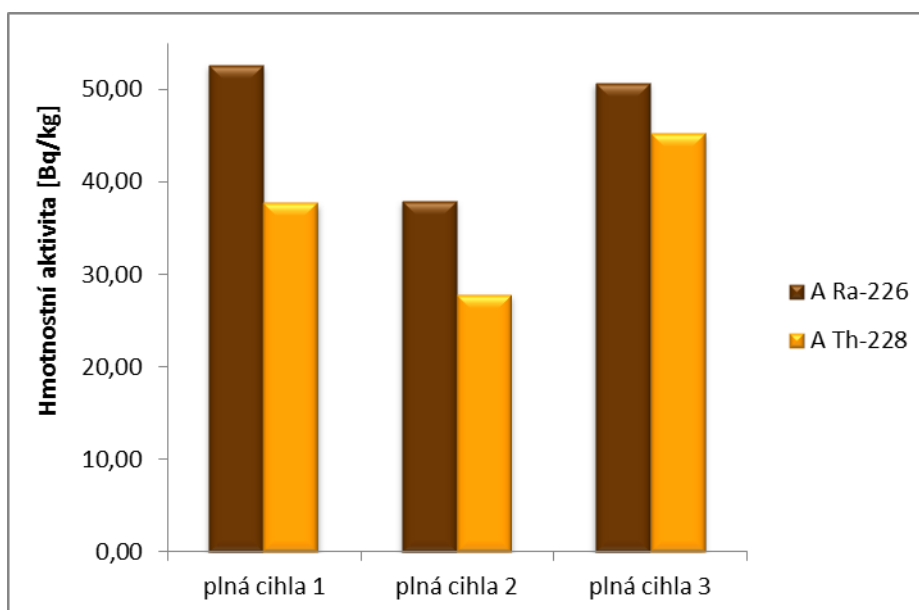
Obrázek 8: Hmotnostní aktivita vzorků Porfix, zdroj: autor

Na obrázku 9 porovnáваме hmotnostní aktivity radia a thoria cihel Heluz. Hmotností aktivita radia se pohybuje okolo 39 Bq/kg a thoria 29 Bq/kg.



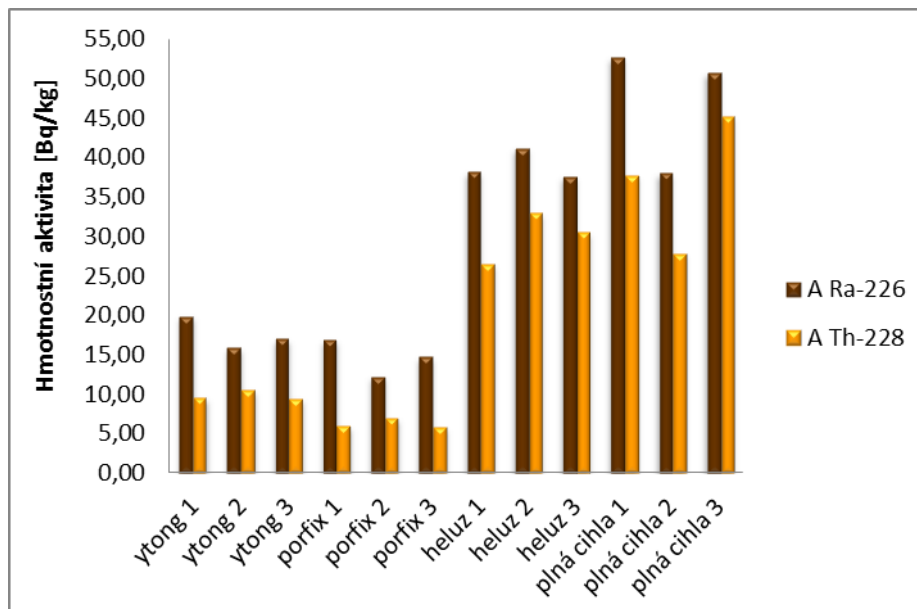
Obrázek 9: Hmotnostní aktivita vzorků Heluz, zdroj: autor

Obrázek 10 ukazuje hmotnostní aktivitu radia a thoria u vzorků plných cihel. Můžeme vidět hmotnostní aktivitu radia pohybující se okolo 50 Bq/kg a thoria 40 Bq/kg. U vzorku plná cihla 2 jsou tyto hodnoty asi o 1/3 nižší.



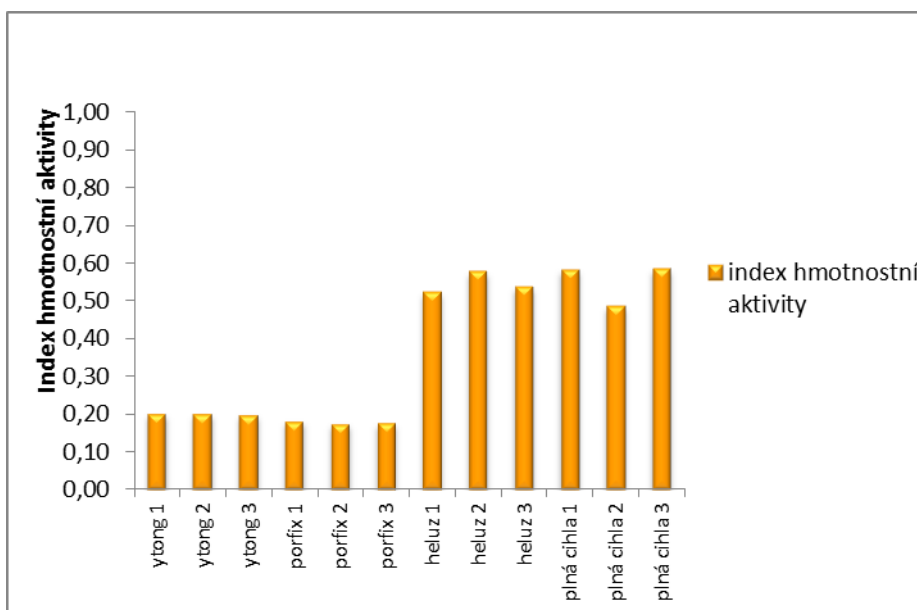
Obrázek 10: Hmotnostní aktivita vzorků plná cihla, zdroj: autor

Obrázek 11 porovnává hmotnostní aktivity radia a thoria. U keramických materiálů je přibližně 3x vyšší, než u vzorků autoklávovaných pórobetonů.



Obrázek 11: Porovnání hmotnostních aktivit radia a thoria, zdroj: autor

Na obrázku 12 je vyobrazen index hmotností aktivity. Všechny vzorky splňují předepsaný limit indexu hmotnostní aktivity I , který je dle nově platné vyhlášky č. 422/2016, § 102 odst. 4, roven 1.



Obrázek 12: Index hmotnostní aktivity, zdroj: autor

4.2 Výsledky chemické analýzy

Další použitou metodou byla OES-ICP, pomocí které bylo objasněno chemické složení odebraných cihel. V Tabulkách 3 a 4 nalezneme výsledky chemické analýzy vzorků. Hodnoty jsou uvedeny v hmotnostních procentech oxidů daných prvků. Ytong obsahuje okolo 17 % vápníku a Porfix ještě asi o 2 % více. Dále vzorky cihel obsahují v různém množství železo, draslík, hořčík, sodík a síru. Vzorky 2. skupiny mají vysoké zastoupení železa, a to přibližně 10 %. Cihla Heluz navíc obsahuje asi 10 % vápníku, který ve vzorcích plných cihel nebyl detekován. Vzorky obsahují i draslík, hořčík, sodík, fosfor, síru s nepatrným množstvím titanu.

CHEMICKÁ ANALÝZA (OES-ICP)

navážka	[g]	ytong 1	ytong 2	ytong 3	porfix 1	porfix 2	porfix 3
objem	[l]	0,05					
obsah CaO	h	15,75	17,01	17,09	18,01	18,55	19,60
obsah Fe ₂ O ₃	m	0,88	1,02	0,99	2,59	2,62	2,67
obsah K ₂ O	o	1,46	1,75	1,69	2,51	2,37	2,50
obsah MgO	t	0,08	0,09	0,09	0,39	0,40	0,42
obsah Na ₂ O	.	0,17	0,19	0,19	1,24	1,18	1,22
obsah P ₂ O ₅	—	---	---	---	---	---	---
obsah SO ₃	%	2,13	2,36	2,34	1,84	1,93	1,95
obsah TiO ₂	—	---	---	---	---	0,06	0,07

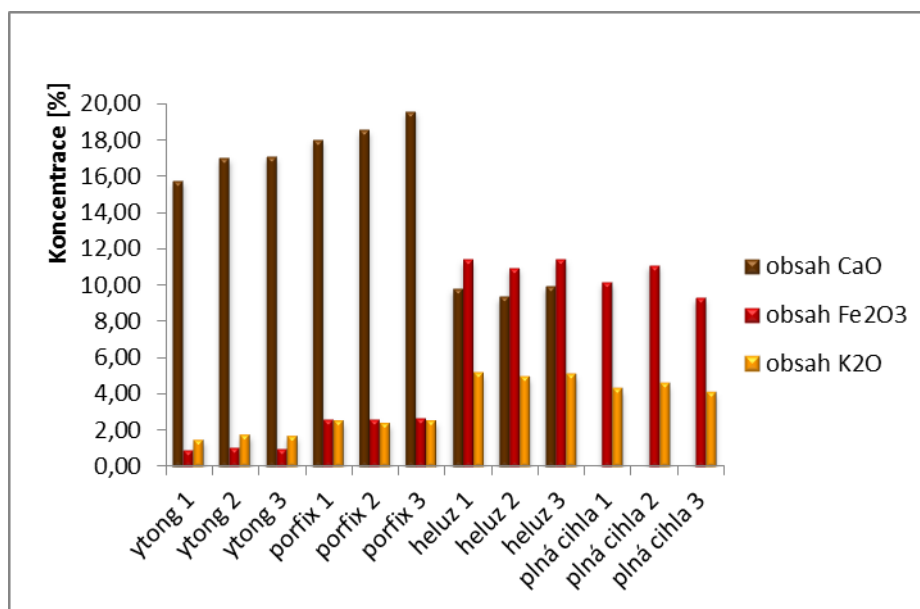
Tabulka 3: Chemické složení stavebních hmot z autoklávovaného pórobetonu, zdroj: autor

CHEMICKÁ ANALÝZA (OES-ICP)

navážka	[g]	heluz 1	heluz 2	heluz 3	plná cihla 1	plná cihla 2	plná cihla 3
objem	[l]	0,05					
obsah CaO	h	9,82	9,35	9,96	---	---	---
obsah Fe ₂ O ₃	m	11,41	10,96	11,41	10,14	11,10	9,31
obsah K ₂ O	o	5,14	4,92	5,07	4,27	4,55	4,08
obsah MgO	t	3,41	3,29	3,37	1,05	1,32	0,95
obsah Na ₂ O	.	2,07	2,00	2,04	1,79	1,95	1,66
obsah P ₂ O ₅	—	0,11	0,10	0,11	0,03	---	0,04
obsah SO ₃	%	0,65	0,62	0,65	---	---	---
obsah TiO ₂	—	0,37	0,32	0,34	0,56	0,55	0,59

Tabulka 4: Chemické složení stavebních hmot z keramických materiálů, zdroj: autor

Na obrázku 13 můžeme vidět porovnání výsledků měření obsahu vápníku, železa a draslíku v hmotnostních procentech jejich oxidů. Nejvyšší koncentrace vápníku měly cihly autoklávovaných pórobetonů Ytong a Porfix. Cihly druhé skupiny, Heluz a plná cihla, měly podstatně vyšší obsah železa a větší bylo i zastoupení draslíku.



Obrázek 13: Porovnání koncentrace vápníku, železa a draslíku, zdroj: autor

4.3 Výsledky mineralogické analýzy vzorků cihel

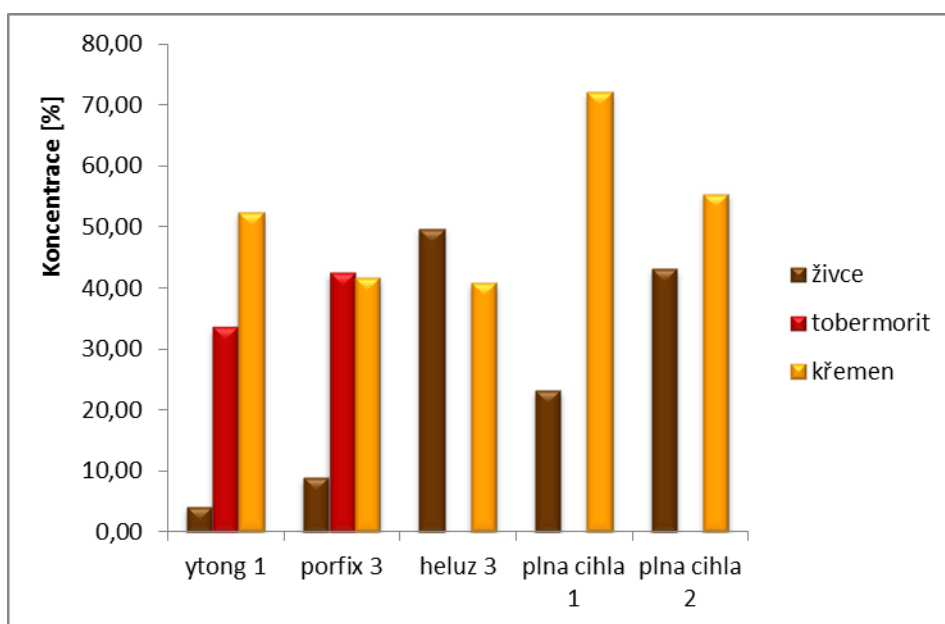
Pro zjištění mineralogického složení byly vzorky měřeny na XRD. Výsledky nalezneme v Tabulce 5. Amorfni fáze nebyla stanovena, protože k analýze nebyl použit standard Al₂O₃. Výsledky jsou tedy přepočítány na 100 % obsahu minerálů krystalické fáze. Zastoupení jednotlivých minerálů je uvedeno v hmotnostních procentech. Největší zastoupení u všech cihel měl křemen a to přibližně od 40 do 70 %. Významným minerálem v 1. skupině byl tobermorit, cihly ho obsahovaly okolo 35–40 %. Ve 2. skupině bylo velké množství hlinitokřemičitanů (albit, ortoklas, muskovit, anortit a flogopit), a to v součtu kolem 40–45 %.

MINERALOGICKÁ ANALÝZA (XRD)

	chemický vzorec	ytong 1	porfix 3	heluz 3	plna cihla 1	plna cihla 2
křemen	SiO ₂	52,45	41,85	40,88	72,20	55,51
kalcit	CaCO ₃	3,91	1,37	---	---	---
albit	NaAlSi ₃ O ₈	---	1,89	16,10	4,00	10,24
ortoklas	h KAlSi ₃ O ₈	4,13	6,99	10,54	9,92	4,69
octan sodný	m C ₂ H ₃ NaO ₂	0,79	1,36	---	---	---
síran vápenatý	o CaSO ₄	4,34	2,55	---	---	---
sádrovec	t CaSO ₄ ·2H ₂ O	0,92	1,55	---	---	---
tobermorit	· Ca ₅ Si ₆ O ₁₆ (OH) ₂ ·4(H ₂ O)	33,47	42,44	---	---	---
hematit	[Fe ₂ O ₃	---	---	1,76	4,58	1,33
mullit	% Al ₆ Si ₂ O ₁₃	---	---	1,96	4,26	2,77
muskovit	[KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂	---	---	21,12	---	15,59
akermanit	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	---	---	7,64	---	---
anortit	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	---	---	---	5,05	---
flogopit	KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (F,OH) ₂	---	---	---	---	9,87

Tabulka 5: Mineralogické složení stavebních hmot, zdroj: autor

Na obrázku 14 je možné vidět porovnání obsahu živců, tobermoritu a křemene ve vybraných vzorcích. Ukazuje vysoké zastoupení živců v keramických materiálech. U vzorku plná cihla 1 je obsah živců menší, vzorek ale obsahuje více křemene.



Obrázek 14: Porovnání koncentrace živců, tobermoritu a křemene, zdroj: autor

5 DISKUZE

Koncentrace radonu přítomného v lidských obydlích je úzce spjata s obsahem radioaktivních izotopů ^{226}Ra a ^{232}Th ve stavebním materiálu. Radon je v přírodě se běžně vyskytující, netečný bezbarvý plyn bez zápachu, proto jej není možné identifikovat bez pomoci speciálních přístrojů. O to víc může být nebezpečný. Jeho produkty štěpení jsou spojovány s výskytem rakoviny plic.

Byly odebrány čtyři druhy cihel po třech replikách, které byly dále rozděleny do dvou skupin. První skupinu tvořily tzv. autoklávované pórobetony, mezi které patří Ytong a Porfix. Do druhé skupiny byly zařazeny cihly Heluz a klasická plná pálená cihla. Obě tyto cihly se řadí mezi keramické materiály.

5.1 Posouzení výsledků gamaspektrometrické analýzy

Hmotnostní aktivita ^{226}Ra se u vzorků 1. skupiny pohybuje v rozmezí 13–20 Bq/kg a ^{228}Th 6–10 Bq/kg. U vzorků 2. skupiny je ^{226}Ra kolem 40–50 Bq/kg a ^{228}Th 30–40 Bq/kg. Z výsledků vyplývá, že materiály druhé skupiny vykazují přibližně 3x vyšší index hmotnostní aktivity. To by mohlo být způsobeno právě vyšším obsahem hlinitokřemičitanů, které patří k nejrozšířenějším minerálům v zemské kůře. Podstatně více jsou živce obsaženy ve vyvřelých a přeměněných horninách (JMK, b.r.). Například v Pákistánských oblastech Faisalabadu a Lahore byly zkoumány vzorky jílových zemin (Tufail a Nasim, 2007). Bylo potvrzeno, že radioaktivita jílových cihel závisí na původu jílu. Chemické a biologické interakce ovlivňují distribuční strukturu uranu a thoria a jejich produkty rozpadu v půdě. Pro představu průměrná hmotnostní aktivita jílové cihly v oblasti Faisalabadu byla pro ^{40}K (493 Bq/kg), ^{226}Ra (22 Bq/kg) a ^{228}Th (46 Bq/kg). Další zemí, kde byly analyzovány vzorky jílových zemin, bylo Holandsko ^{40}K (560 Bq/kg), ^{226}Ra (39 Bq/kg) a ^{228}Th (41 Bq/kg) (Ackers a Boer, 1985). Tyto hodnoty hmotnostních aktivit jsou přibližně na stejné úrovni jako v České republice.

Koncentrace radia a thoria se v jednotlivých typech hornin velmi liší. Lze říci, že v usazených, sedimentárních horninách je obecně nižší než v horninách přeměněných, což by mohlo souviset právě se zvýšeným indexem hmotnostní aktivity. Oproti tomu bylo detekováno, že Ytong a Porfix obsahují minerál tobermorit. Jedná se v podstatě o hydrát vápna a písku, který vzniká až při autoklávování. (ČGS, b.r.; Geologie, mineralogie, historie dolování, 2008)

Z výsledků je také patrné, že vzorky byly vyrobeny z homogenní směsi. Nicméně u vzorku plné cihly 2 je možné vidět sníženou hmotnostní aktivitu asi o 1/3. Z tohoto důvodu byly z této sady vzorků vybrány k mineralogické analýze mimo vzorku plná cihla 1 také plná cihla 2. Tato analýza potvrdila, že vzorek má asi poloviční obsah živců.

5.2 Posouzení výsledků chemické analýzy

Chemické složení bylo analyzováno OES-ICP. V případě porovnání chemické analýzy dojdeme k závěru, že složení obou skupin se podstatně liší. Jak ukazují tabulky 2 a 3, v 1. skupině je bohatě zastoupen vápník (15–20 %), obsah železa (1–2,5 %) a draslíku (1,5–2,5 %) je oproti keramickým materiálům přibližně na polovičních hodnotách. Ve 2. skupině cihel se vápník (10 %) vyskytoval pouze u cihel Heluz, u vzorků plných cihel nebyl vůbec detekován. Naopak obsah železa (10 %) a draslíku (5 %) byl poměrně vysoký. Všechny vzorky bez ohledu na rozdělení také obsahovaly nepatrné množství hořčíku, sodíku a síry. Křemík a hliník nebyl touto metodou stanoven.

5.3 Posouzení výsledků mineralogické analýzy

Mineralogická analýza byla provedena na XRD. Při srovnání složení obsahu minerálů lze říci, že vzorky jednotlivých skupin jsou výrazně rozdílné. Pouze obsah křemene (40–50 %), který v cihlách plní funkci pojiva, je podobný. Cihly Ytong a Porfix jsou vyráběné mimo jiné i z hydrátů vápna a písku, ze kterých autoklávováním vzniká

minerál tobermorit (Ytong 34 % a Porfix 43 %). Obsah tohoto minerálu je ve vzorcích majoritní, jak ukazuje tabulka 4. Na druhou stranu Heluz a plná cihla jsou vyráběny ze sprašových hlín, z tohoto důvodu jsou ve vzorcích bohatě zastoupeny hlinitokřemičitany, tzv. živce (albit, ortoklas, muskovit anortit a flogopit). Celková koncentrace těchto minerálů v cihlách Heluz se pohybuje od 40 do 50 %. Výjimku tvoří vzorek plné cihly 1, kde je obsah živců pouze asi 25 %. To bude pravděpodobně způsobeno zvýšenou koncentrací křemene. Hematit neboli oxid železitý byl nejvíce přítomen v cihlách keramických materiálů, i proto jsou tyto cihly zbarveny do červena. Další důvod jejich zbarvení může tkvět ve zvýšeném obsahu draslíku, protože muskovit, jinak také zvaný draselný živec, může mít červenou barvu. Minerál muskovit je v tomto typu vzorků bohatě zastoupen.

5.4 Shrnutí výsledků

Bylo analyzováno chemické a mineralogické složení 4 druhů cihel a pomocí polovodičové spektrometrie gama byla změřena hmotnostní aktivita radionuklidů ^{40}K , ^{226}Ra a ^{228}Th . Také byl vyhodnocen index hmotnostní aktivity, který úzce souvisí s obsahem radonu, který je produktem uran-radiové rozpadové řady. ^{222}Rn vzniká rozpadem ^{226}Ra a radium zase vzniká z ^{228}Th . Podle jedné italské studie (Trevisi a kol., 2008) je v České republice průměrná koncentrace ^{228}Th vyšší než ^{226}Ra . To se tímto výzkumem nepotvrdilo, nicméně na stejný problém naráží již výše zmíněná studie jílových cihel v Pákistánu (Tufail a Nasim, 2007). Radioaktivní ^{40}K není pro vznik radonu podstatný, protože se radioaktivní přeměnou beta rozpadá na ^{40}Ar a elektronovým záchytem na ^{40}Ca . Oba tyto dceřiné izotopy jsou stabilní a další rozpad již nepokračuje. Nicméně koncentrace radioaktivních látek je závislá na chemickém a mineralogickém složení stavebních hmot. Z výsledků také vyplývá, že všechny vzorky splňují zákonné požadavky na obsah radioaktivních nuklidů ve stavebních materiálech (Radon test, b.r; Ullmann, b.r.).

V této bakalářské práci byla položena tato výzkumná otázka: Je obsah radonu ve stavebních materiálech závislý na chemickém a mineralogickém složení stavebního materiálu?

Měřením a porovnáním výsledků s odbornou literaturou v této práci bylo dokázáno, že obsah radonu ve stavebním materiálu je skutečně závislý na jeho složení.

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá závislostí radonu na stavebních materiálech, konkrétně na jejich chemickém a mineralogickém složení. Pro správné posouzení této závislosti byla provedena chemická, mineralogická a gamaspektrometrická analýza. Zkoumané vzorky byly odebrány z několika druhů cihel, vyráběných odlišnou technologií, z rozdílných surovin na různých místech v České republice. Vzorky byly rozděleny do dvou skupin. Do první skupiny byly zařazeny cihly Porfix a Ytong. Tyto vzorky patří mezi tzv. autoklávované pórobetony. Druhou skupinu tvořily cihly Heluz a plné cihly, což jsou keramické materiály. Ve vzorcích první skupiny byl stanoven vysoký obsah vápníku, křemene a tobermoritu. Přítomnost tobermoritu a vápníku spolu úzce souvisí, protože tobermorit vzniká autoklávováním směsi hydrátu vápna s pískem. U vzorků druhé skupiny byl zjištěn velký podíl železa, draslíku, částečně i vápníku (Heluz), křemene a hlinitokřemičitanů (albit, ortoklas, mullit, muskovit, anortit, flogopit). Hematit neboli oxid železitý spolu s muskovitem způsobuje keramickým materiálům pro ně tak charakteristickou červenou barvu. Draslík i vápník jsou důležitými prvky ve stavbě hlinitokřemičitanů. Křemen v cihlách plní funkci pojiva, z tohoto důvodu je ve vysoké koncentraci přítomen u všech zkoumaných vzorků. Asi trojnásobnou hmotnostní aktivitu vykazovaly vzorky keramických materiálů. To by mohlo být způsobeno již vstupními surovinami používanými k výrobě. Jak potvrdila mineralogická analýza, tyto cihly obsahují velké množství hlinitokřemičitanů – minerálů obsažených ve vyvřelých a přeměněných horninách. Je dokázáno, že tyto horniny mají zvýšenou hmotnostní aktivitu. Nicméně, z porovnání vypočítaného indexu hmotnostní aktivity s certifikovanou hodnotou vyplývá, že všechny vzorky splňují zákonné limity pro obsah radionuklidů ve stavebních materiálech.

Na položenou výzkumnou otázku lze odpovědět, že obsah radonu je závislý na složení stavebního materiálu.

7 SEZNAM INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

ACKERS, J.G. DEN BOER, J.F. DE JONG, P. WOLSCHRIJN, R.A. 1985. Radioactivity and radon exhalation rates of building materials in The Netherlands. *Science of The Total Environment*. 45. 151-156.

ČGS (Česká geologická služba), *Radon a geologie*. Dostupné z: http://www.geology.cz/demo/CD_RADON50/index/info.htm

Geologie, mineralogie, historie dolování. 2008. *Živce*. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.velebil.net/mineraly/zivce>

Heluz, *O společnosti heluz*. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.heluz.cz/cs/o-nas>

CHAMBERS, D. B. ZIELINSKI, J. M. 2011. Residential Radon Levels Around the World. *Encyclopedia of Environmental Health*, edited by JO Nriagu.

CHAUHAN, R. P. NAIN, M. KANT, K. 2008. Radon diffusion studies through some building materials: Effect of grain size. *Radiation Measurements*. 43, S445-S448.

CHYBÍK, J. 2009. *Přírodní stavební materiály*. Praha: Grada. Stavitel. ISBN 978-80-247-2532-1.

JMK (Jihočeský mineralogický klub), *Živce*. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.mineraly.org/mineraly/?podle=abecedy&clanek=516>

KLOUDA, P. 2003. *Moderní analytické metody*. 2., upr. a dopl. vyd. Ostrava: Pavel Klouda. ISBN 80-863-6907-2.

KROUPA, M. DVORSKÝ, B. *Spektrometrie záření gama*. 2. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2008/cd/prispevky/sbpdf/gamma.pdf>

Kurz ICP spektrometrie, 2009. Brno: Spektroskopická společnost Jana Marka Marci [cit. 2017-04-26]. ISBN 978-809-0373-280.

LEDEROVÁ, J. LEDER, P. 2008. Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot. *Časopis stavebnictví*. (04) [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/vyuziti-prumyslovyh-odpadnich-materialu-pri-vyrobe-stavebnich-hmot_A753_I18

Muzeum, *Obecná mineralogie*. [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: http://muzeum.mineral.cz/mineralogie/ucebnice/obecna_min/o_351.php

NASTRO, V. CARNÌ, D.L. VITALE, A. LAMONACA, F. VASILE, M. 2016. Passive and active methods for Radon pollution measurements in historical heritage buildings. *Measurement*. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224116305024>

NAVRÁTIL, L. FREITINGER SKALICKÁ, Z. HALAŠKA, J. HAVRÁNKOVÁ, R. KUBEŠ, J. NAVRÁTIL, V. SABOL, J. SIROVÝ, L. ZÖLZER, F. 2010. *Radioaktivita*. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/13/132.html>

NAVRÁTIL, V. 2005. Radon a zdraví člověka. *Universitas*. Brno, 2004(3.), 45-49 [cit. 2017-03-29].

NÖLTE, J. c2003. *ICP emission spectrometry: a practical guide*. Weinheim [Germany]: Wiley-VCH. ISBN 3527306722.

PETROVÁ, K. 2009. *Radiační ochrana: Měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech*. Státní úřad pro jadernou bezpečnost [cit. 2017-03-26].

Porfix, 2016. *Technické listy 2016 web*. Trutnov. Dostupné také z: https://www.porfix.cz/media/uploads/technicke_listy_2016_web.pdf

Pórobeton- kynutý stavební materiál, *Chempoint*. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/straka>

Pórobeton Ytong, [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <https://www.ytong.cz/porobeton-ytong.php>

Radon test, *Co je radon*. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.iradontest.cz/co-je-radon.html>

Radon test, *Radon ve světě*. [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://www.iradontest.cz/radon-ve-svete.html>

ROSARIO, A.S. WICHMANN, H.-E. 2006. Environmental pollutants Radon. *Encyclopedia of Respiratory Medicine*. Elsevier, 120 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0123708796001356>

SOMMER, L. 1992. *Optická emisní spektrometrie v indukčně vázaném plazmatu a vysokoteplotních plamenech*. Praha: Academia. Pokroky chemie, ISBN 80-200-0215-4.

Společnost Bruker s.r.o., *Rentgenová difrakce XRD*. [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://www.bruker-sro.cz/rentgenova-difrakce-xrd>

Státní ústav radiační ochrany v.v.i., *Radon včera a dnes*. [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/historie-radonove-problematiky/radon-vcera-a-dnes>

Stavebnictví v obrazech, *Heluz, skvělé cihly pro Váš dům*. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://koordinuj.cz/partneri/heluz/index.html>

SVOBODA, L. 2013. *Stavební hmoty*. 3. Praha. [cit. 2017-03-28]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/SH3v1.pdf>

THOMAS, J. HŮLKA, J. TOMÁŠEK, L. FOJTÍKOVÁ, I. BARNET, I. 2002. Determination of radon prone areas by probabilistic analysis of indoor survey results and geological prognostic maps in the Czech Republic. *International Congress Series*. 1225. 49-54 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0531513101005453>

TREVISI, R. D'ALESSANDRO, M. NUCCETELLI, C. RISICA, S. 2008. Radioactivity in building materials: a first overview of the European scenario.

In: *Proceedings of the 12th international congress of the international radiation protection association, Buenos Aires, Argentina.* p. 19-24.

TUFAIL, M. NASIM, A. JAVIED, S. HAMID, T. 2007. Natural radioactivity hazards of building bricks fabricated from saline soil of two districts of Pakistan. *Journal of radiological protection.* 27.4: 481.

Ullmann, V. *Detekce a spektrometrie ionizujícího záření.* [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#5>

Ullmann, V. *Radionuklidy.* [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>

Vše pro Váš dům, *Jak se vyrábějí pálené cihly HELUZ.* [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.vseprovasdum.cz/jak-se-vyrabeji-palene-cihly-heluz.html>

Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. In: Sběrka zákonů ČR: 2016, ročník 2016, částka 172.

8 SEZNAM ZKRATEK

^{40}K	Draslík
^{40}Ar	Argon
^{40}Ca	Vápník
^{222}Rn	Radon
^{220}Rn	Thoron
^{219}Rn	Actinon
^{226}Ra	Radium
^{232}Th	Thorium
^{238}U	Uran
^{214}Bi	Bismut
^{214}Po	Polonium
^{218}Po	Polonium
^{214}Pb	Olovo
OES-ICP	Opticko-emisní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem
XRD	Rentgenová prášková difrakce
HPGe	Vysoce čisté germanium
WHO	Světová zdravotnická organizace
ČR	Česká republika
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

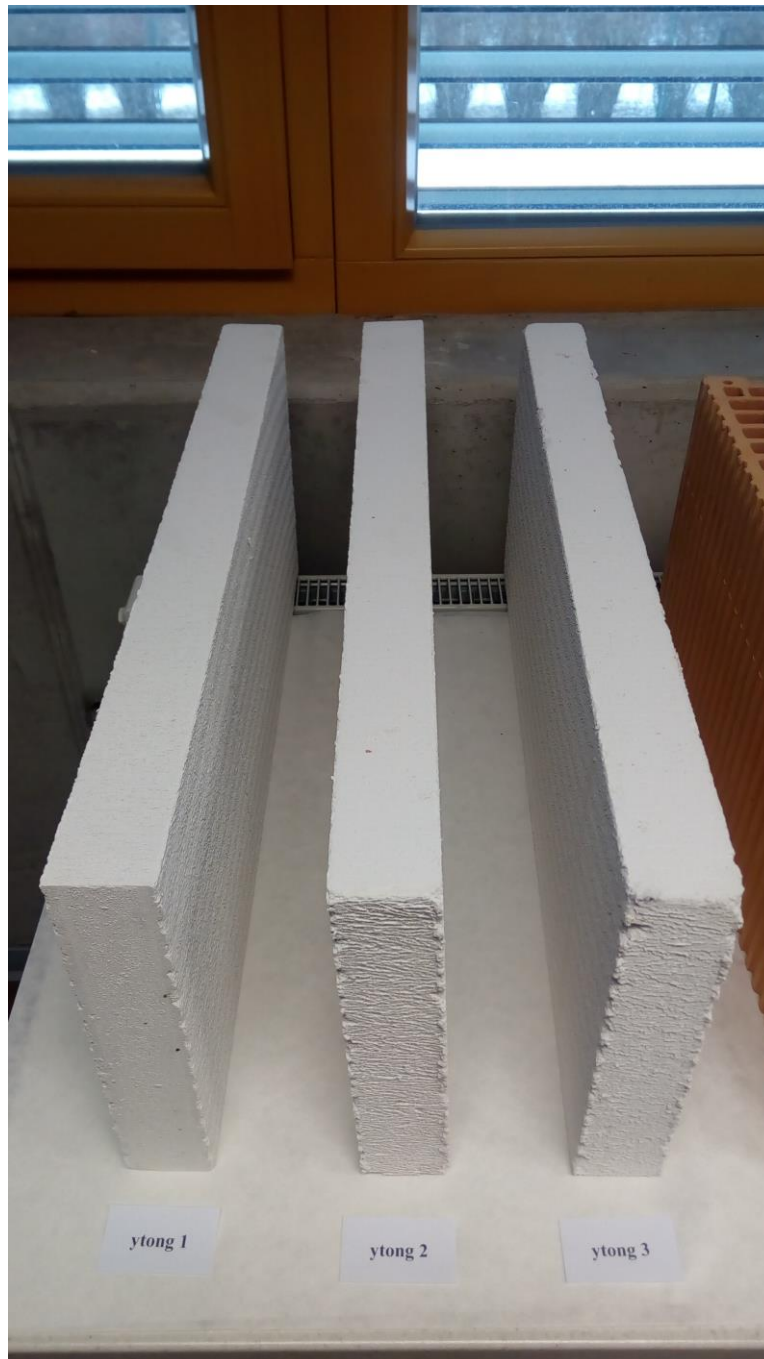
Obrázek 1	Geologická prognózní mapa
Obrázek 2	Hmoždířový mlýn Retsch
Obrázek 3	Mikrovlnný rozklad Berghof SW 4
Obrázek 4	Opticko-emisní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem
Obrázek 5	Rentgenová difrakční analýza
Obrázek 6	Difraktogram vzorku Ytong 1
Obrázek 7	Hmotnostní aktivita vzorků Ytong
Obrázek 8	Hmotnostní aktivita vzorků Porfix
Obrázek 9	Hmotnostní aktivita vzorků Heluz
Obrázek 10	Hmotnostní aktivita vzorků plná cihla
Obrázek 11	Porovnání hmotnostních aktivit radia a thoria
Obrázek 12	Index hmotnostní aktivity
Obrázek 13	Porovnání koncentrace vápníku, železa a draslíku
Obrázek 14	Porovnání koncentrace živců, tobermoritu a křemene
Tabulka 1	Vzorky cihel odebrané k analýze
Tabulka 2	Index hmotnostní aktivity stavebních hmot
Tabulka 3	Chemické složení stavebních hmot z autoklávovaného pórobetonu
Tabulka 4	Chemické složení stavebních hmot z keramických materiálů
Tabulka 5	Mineralogické složení stavebních hmot

10 SEZNAM PŘÍLOH

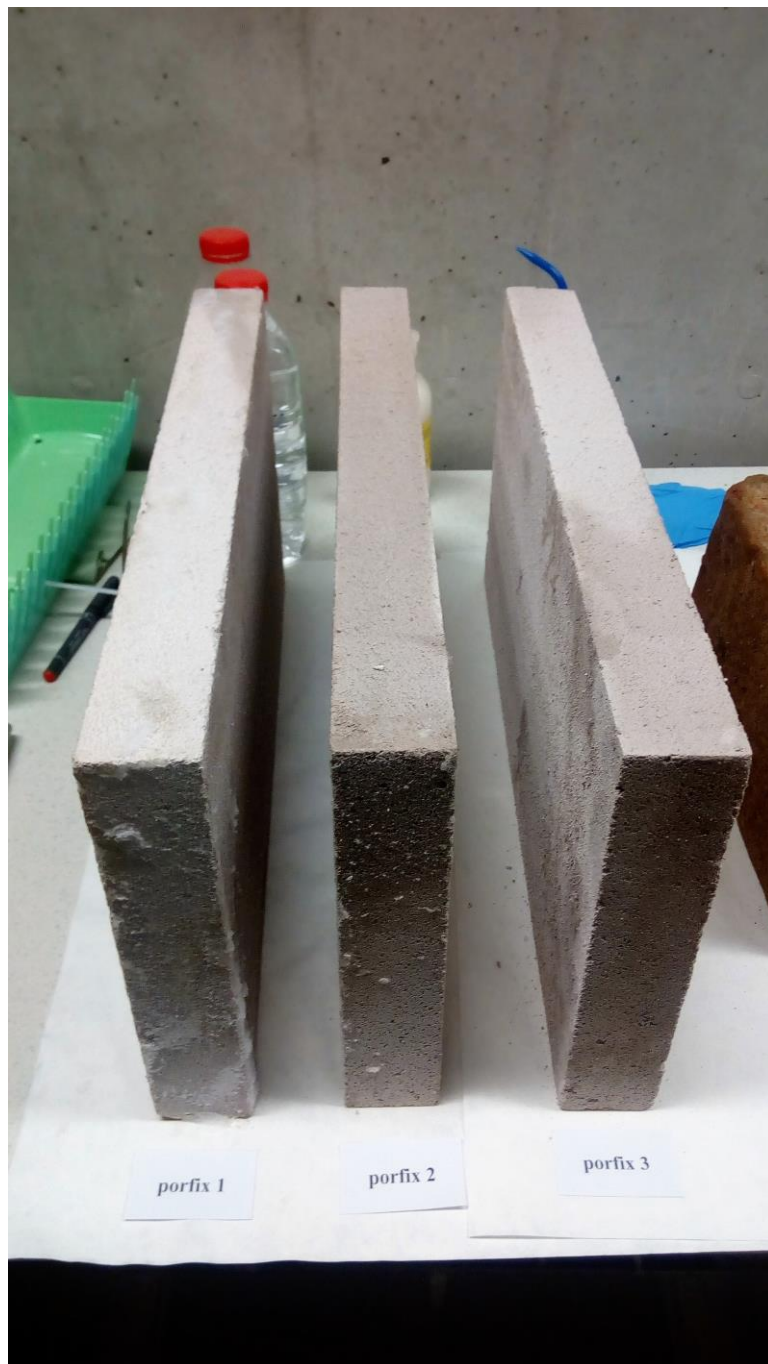
- Příloha A Odebrané vzorky cihel Ytong, Porfix, Heluz a plná cihla
- Příloha B Rozemleté vzorky cihel Ytong, Porfix, Heluz a plná cihla pro gamaspektrometrickou analýzu
- Příloha C Rozemleté vzorky cihel připravené pro chemickou a mineralogickou analýzu

PŘÍLOHY

Příloha A – Odebrané vzorky cihel Ytong, Porfix, Heluz a plná cihla



Ytong P4-500 hladká, zdroj: autor



Porfix P2-500 hladká, zdroj: autor



Heluz 11,5 broušená, zdroj: autor



Pálená cihla z klášterní zdi v Nové Říši, zdroj: autor

Příloha B – Rozemleté vzorky cihel Ytong, Porfix, Heluz a plná cihla pro gamaspektrometrickou analýzu



Ytong v Marinelliho nádobě, zdroj: autor



Porfix v Marinelliho nádobě, zdroj: autor



Heluz v Marinelliho nádobě, zdroj: autor



Plná cihla v Marinelliho nádobě, zdroj: autor

Příloha A – Rozemleté vzorky cihel připravené pro chemickou a mineralogickou analýzu



Vzorky k analýze na OES-ICP a XRD, zdroj: autor