

Gymnázium Přírodní škola, o.p.s.  
Profilová práce — třída Mí  
Vyšší stupeň studia  
2020/2021

Jakub Fojtík

**Návrh a testování aparatury pro  
měření míry emanace radonu  
ze stavebních materiálů**

Vedoucí práce: Ing. Filip Hložek

Datum odevzdání: 5. února 2021



## ABSTRAKT

Inhalace radonu je podle světové zdravotnické organizace druhou nejčastější příčinou vzniku rakoviny plic. Přibližně polovina efektivního dávkového ekvivalentu v České republice na osobu pochází z produktů uran-radiové rozpadové řady. Radon se do budov, kde ho poté dýcháme, dostává minoritně i emanací ze stavebních materiálů.

Tato práce se zabývá vytvořením a otestováním uspořádání pro kontinuální měření za pomoci radonového detektoru Airthings Corentium Pro jako náhrady za pracné ruční odběry. Také se zabývá vytvořením a uspořádáním aparatury pro průtokové měření objemové aktivity radonu ze stavebních materiálu za použití radonového detektoru RAD7.

Uspořádání s využitím radonového detektoru Airthings Corentium Pro je vhodnou náhradou ručních odběrů. Hodnoty naměřené vytvořeným uspořádáním pro průtokové měření za použití detektoru RAD7 byly porovnány s výsledky z měření uspořádáním pro kontinuální měření za pomoci radonového detektoru Airthings Corentium Pro. Z výsledků je patrné, že ve vytvořeném průtokovém uspořádání se zapojením RAD7 dochází při měření k úniku plynu z aparatury a naměřené výsledky nejsou za tohoto uspořádání správné ani přesné. Pro zajištění přesnosti výsledků je nutné eliminovat možnosti úniku plynu z aparatury.

**Klíčová slova:** radon, objemová aktivita radonu, emanace, míra emanace, stavební materiál, detektor radonu



## PODĚKOVÁNÍ

V první řadě patří dík mému vedoucímu práce Ing. Filipovi Hložkovi za vedení práce, cenné rady a pomoc při sepisování práce. Dále bych chtěl poděkovat Janu Hradeckému za velkou pomoc při experimentální části práce, Ivaně Fojtíkové za pomoc při porozumění tématu, hledání podkladů k práci, pomoc při sepisování práce a obrovskou podporu. Také chci poděkovat Státnímu ústavu radiační ochrany za poskytnutí prostorů a materiálu k práci. A nakonec chci poděkovat všem, kdo se jinak podíleli na tvorbě této práce.



## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>4</b>
2.1	Radon.....	4
2.1.1	Radonová problematika .....	4
2.2	Veličiny .....	5
2.2.1	Aktivita.....	5
2.2.2	Míra emanace radonu .....	8
<b>3</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
3.1	Příprava měření .....	10
3.1.1	Příprava emanační nádoby .....	10
3.1.2	Příprava měřeného vzorku .....	11
3.2	Použité metody .....	12
3.2.1	Metoda ručních odběrů plynného vzorku .....	12
3.2.2	Metoda měření za pomoci radonových sond .....	13
3.2.3	Metoda měření s využitím detektoru radonu RAD7 .....	16
<b>4</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>19</b>
4.1	Uspořádání s využitím radonového detektoru Airthings Corentium Pro ..	19
4.1.1	Rynholecký škvárobeton.....	19
4.1.2	Plynosilikát.....	19
4.2	Průtokové uspořádání s využitím detektoru radonu RAD7.....	22
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>24</b>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Aktivita
A	Objemová aktivita
$a_{\infty}$	Objemová aktivita v rovnovážném stavu
$A_p$	konstantní přísun v modelu konstantního přísunu a konstantní intenzity větrání
Bq	jednotka becquerel
E	míra emanace
e	eulerovo číslo, základ přirozeného logaritmu
$H_E$	Efektivní dávkový ekvivalent
k	Intenzita větrání v modelu konstantního přísunu a konstantní intenzity větrání
N	počet jader/částic
$N_0$	počet částic v čase $t = 0$
Ra	Radium
RaA	$Po^{218}$ , dceřiný produkt přeměny radonu
RaB	$Pb^{214}$ , dceřiný produkt přeměny radonu
RaC	$Bi^{214}$ , dceřiný produkt přeměny radonu
RaC'	$Po^{214}$ , dceřiný produkt přeměny radonu
RaC''	$Tl^{210}$ , dceřiný produkt přeměny radonu
RaD	$Pb^{210}$ , dceřiný produkt přeměny radonu
RaE	$Bi^{210}$ , dceřiný produkt přeměny radonu
RaF	$Po^{210}$ , dceřiný produkt přeměny radonu
RaG	$Pb^{206}$ , dceřiný produkt přeměny radonu
$Rn^{220}$	thoron, izotop radonu
$Rn^{222}$	radon, izotop radonu
s	plocha
t	čas
$T_{1/2}$	poločas přeměny
V	objem
$\alpha$ přeměna	radioaktivní přeměna provázená vznikem $\alpha_2^4$ částice
$\lambda$	přeměnová konstanta

# 1 ÚVOD

Radon (Rn) je radioaktivní plyn VIII. A skupiny periodické tabulky. Nejběžnějšími izotopy radonu jsou  $Rn^{222}$ , který je produktem uran-radiové rozpadové řady, a  $Rn^{220}$ , často označovaný jako thoron, který je produktem thoriové rozpadové řady. Radon je dceřiným produktem radia a vzniká alfa přeměnou. Proto místem s největším výskytem radonu je zemská kůra.

Radium je prvek nacházející se za normálních podmínek v pevném skupenství látky. Je tedy v zemské kůře vázáno na molekuly horniny. Po přeměně  $Ra \xrightarrow{\alpha} Rn$  se radon uvolňuje z molekulové mřížky, emanuje z horniny a putuje se zemním vzduchem puklinami vzhůru, až se může uvolnit ze zemské kůry. Tímto se část radonu z podloží dostává do ovzduší, část zůstává zachycena v podloží, kde dále podléhá radioaktivní přeměně. Radon se dále přeměňuje na Polonium (Po) a dále až na stabilní izotopy olova.

Radon představuje obrovské zdravotní riziko. Podle Světové zdravotnické organizace je po kouření radon druhou nejčastější příčinou vzniku rakoviny plic [1]. Radon ze zemského podloží se může dostat (difuzí nebo konvekci) do budov a objektů, kde se při nedostatečném odvětrávání koncentruje a přeměňuje na již pevné částice svých dceřiných produktů. Ty jsou pak ve formě aerosolu a iontů vdechovány do dýchacích cest a do plic, kde vysokými dávkami ozařují tkáň. Téměř polovinu průměrné dávky na obyvatele v České republice má na svědomí právě radon v budovách [2]. Jak již bylo řečeno, radon se do budovy dostává především z podloží pod budovou. Další nezanedbatelná část objemu lidmi inhalovaného radonu pochází ze stavebních materiálů, ze kterých je budova postavena, ty mají svůj původ rovněž v přírodě a obsahují přírodní radionuklidy včetně prvků přírodních radioaktivních řad.

V sedmdesátých a osmdesátých letech 20. století se stavěly domy typu START právě z materiálů s vysokým obsahem radionuklidů [3]. Takové domy představují bezpečnostní riziko pro lidi, kteří v nich žijí. Dnešní legislativa již při stavbách domů zohledňuje radonovou problematiku a státní instituce pracují na výuce obyvatelstva o radonové problematice.

Používat na stavbu materiály s vysokým obsahem radionuklidů by potenciálně nemusel být takový problém, pokud by se snížila schopnost radonu emanovat ze stěn do vnitřních prostorů budovy. Míra emanace radonu ze stavebních materiálů záleží

především na vlastnostech materiálu, jako jsou například jeho poréznost, vlhkost a jiné chemicko-fyzikální vlastnosti. Matematický popis systému vychází ze zjednodušeného modelu konstantního přísunu radonu a konstantní intenzity větrání.

Měření míry emanace radonu ze stavebních materiálů se začalo objevovat až v tomto století a v České republice ani jinde na světě mu dosud nebyla přikládána taková pozornost jako jiným disciplínám radiační ochrany. Tato práce se inspirovuje citovanými publikacemi [4][5].

Dodnes se k měření objemové aktivity radonu ze vzorku stavebního materiálu používala metoda ručních odběrů popsaná v kapitole 3.2.1. Tato metoda je však složitá na provedení, protože je během ní potřeba neustále odebírat plynný vzorek a měřit jeho aktivitu. To je náročné jak na čas, tak i na materiál. V dnešní době jsou však na trhu mnohé radonové monitory a sondy, které by potenciálně mohly nahradit metodu ručních odběrů.

Cílem práce bylo sestavit a optimalizovat aparaturu pro měření objemové aktivity radonu pocházejícího ze stavebních materiálů pro účely stanovení míry emanace radonu ze stavebního materiálu, která by sloužila jako alternativa pro metodu ručních odběrů. Pro tato uspořádání byly zvoleny monitory radonu Airthings Corentium Pro a RAD7.

V práci se porovnávalo kontinuální stacionární uspořádání, které využívalo známý a osvědčený radonový detektor Airthings Corentium Pro, a vytvořené průtokové uspořádání aparatury s použitím měřicího přístroje Rad7. Mimo to byly na vzorku několikrát prováděny ruční odběry pro měření elektrometrem ERM3.

Pro splnění cíle práce byly vytyčeny některé otázky a úkoly:

- a. Poslouží kontinuální metoda měření objemové aktivity radonu využívající radonové detektory jako vhodná alternativa pro metodu ručních odběrů?
- b. Jakým způsobem je vhodné detektory do aparatury umístit, aby byly dosaženy přesné hodnoty?
- c. Je průtokové uspořádání se zapojením přístroje Rad7 k emanační komoře dostatečnou alternativou pro měření objemové aktivity radonu ve stacionárním uspořádání se sondami a ručními odběry?
- d. Jakým způsobem je do aparatury potřeba Rad7 zapojit, aby bylo uspořádání úspěšné?

- e. Jaký je optimální postup pro výpočet míry emanace ze změřené objemové aktivity radonu?

V kapitole Teoretická část se čtenář dozví veličiny a jednotky používané v práci, tak též i odvozené vztahy pro potřeby této práce a úvod do radonové problematiky.

V kapitole Experimentální část se čtenář dočte o metodách, které byly použity prováděny v experimentální části této práce.

V kapitole Výsledky jsou shrnuty poznatky a výsledky metod.

V závěrečné kapitole s názvem Závěr jsou pak k nalezení odpovědi na otázky z úvodu a některé další shrnující informace o práci.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Radon

Nejčastějším izotopem radonu je  $Rn^{222}$ . Jak již byla řeč, je to inertní plyn a vzniká radioaktivní alfa přeměnou  $Ra^{226}$ .  $Rn^{222}$  je produktem uran-radiové rozpadové řady.

Radioaktivní alfa přeměnou (5,49 MeV) vznikají jeho dceřiné produkty s relativně krátkými poločasy přeměny, které se za normálních podmínek vyskytují ve formě pevných látek. Poločas přeměny  $Rn^{222}$  je 3,8 dne. Dceřiné produkty jsou: RaA ( $Po^{218}$ ), RaB ( $Pb^{214}$ ), RaC ( $Bi^{214}$ ), RaC' ( $Po^{214}$ ), RaC'' ( $Tl^{210}$ ), RaD ( $Pb^{210}$ ), RaE ( $Bi^{210}$ ), RaF ( $Po^{210}$ ), RaG ( $Pb^{206}$  - stabilní izotop) [6]. V případě, že se radon přemění ve vzduchu, vzniknou nabitě ionty prvků jeho dceřiných produktů. Ty jsou nestabilní, takže se část z nich připojí na prachové částičky a částice aerosolu. Tyto větší částice zůstávají částečně v atmosféře, částečně se usazují na dostupné povrchy.

Produkty přeměny RaA až RaC'' mají mnohem menší poločas přeměny než  $Rn^{222}$ . Také alfa částice vzniklé při přeměnách  $RaA \rightarrow RaB$  a  $RaC' \rightarrow RaD$  mají poměrně vysokou energii. V prvním případě se jedná o 6 MeV a ve druhém pak o 7,69 MeV [7].

Dále je znám izotop  $Rn^{220}$ , někdy nazýván také thoron, který má ovšem mnohem menší procentuální zastoupení v radon. Je dceřiným produktem izotopu  $Ra^{224}$  a je součástí thoriové rozpadové řady, odtud jeho název. Jeho poločas rozpadu je 55,3 s [6].

#### 2.1.1 Radonová problematika

Jak bylo zmíněno výše, podíl dávek ozáření způsobených radonem a produkty jeho přeměny na celkové dávce ozáření je poměrně vysoký. Největší efektivní dávkové ekvivalenty ( $[H_E] = \mu Sv$ ) z přírodních radionuklidů pochází od  $Rn^{222}$  a  $Rn^{220}$  a jejich dceřiné produkty [8].

Ozáření radonem je považováno za druhou nejčastější příčinu vzniku rakoviny plic [1] hned po kouření. Podle §97 vyhlášky č. 422/2016 Sb. je hodnota ročního průměru objemové aktivity radonu ve vzduchu  $3000 Bq \cdot m^{-3}$ . Při jejím překročení je vlastník budovy s obytnou nebo pobytovou místností povinen provést opatření, která snižují míru ozáření. Referenční hodnota, tedy hodnota doporučená pro obytnou nebo pobytovou místnost, pro pracoviště nebo prostory veřejných budov včetně škol je  $300 Bq \cdot m^{-3}$ . Evropská legislativa udává stejné referenční a mezní hodnoty jako

česká legislativa [9]. Průměrná objemová aktivita radonu v České republice je  $118 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$  [10]

Do budov se radon dostává především difuzí ze zemského podloží kvůli vytvořenému gradientu koncentrace radonu pod objektem a v něm nebo konvekci (aktivním nasáváním zemního vzduchu s radonem skrz praskliny v kontaktních konstrukcích). V průběhu roku se objemová aktivita radonu v domě mění. Největší nárůst je během období zimy. To je především způsobeno méně častým větráním a větším vytápěním. Tím se zvětšuje teplotní gradient a radon je nasáván do objektu.

Přes den se aktivita v místnostech mění, snižuje se s intenzitou jejich větrání [11]. Koncentrace radonu v budově souvisí s množstvím radonu přítomným v podloží pod objektem. Dalšími parametry, které ovlivňují množství radonu v budově, jsou plynopropustnost podloží pod budovou, těsnost kontaktních vodorovných konstrukcí objektu vůči podloží [11].

Druhou nejčastější příčinou vniknutí radonu do budovy, je emanace ze stavebních materiálů. Množství radonu, který se emanací dostane do interiéru, závisí na množství obsažených radionuklidů uran-radiové rozpadové řady (především na hmotnostní aktivitě  $\text{Ra}^{226}$ ) a na poréznosti stavebního materiálu budovy.

## 2.2 Veličiny

Nejdůležitější veličina jaderných věd je aktivita  $A$ , s jednotkou  $\text{Bq}$  (becquerel), v jednotkách  $\text{SI s}^{-1}$ . Jde o veličinu popisující počet přeměněných jader, tedy úbytek původních atomů za jednotku času.

Dále existují a častěji se používají jednotky aktivity vztažené k jednotce hmotnosti, objemu, látkového množství, plošného objemu, času nebo plochy. Tato práce vyhodnocuje a pracuje s výsledky měření objemové aktivity radonu (OAR) uvolněné ze vzorku stavebního materiálu  $[a] = \text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ .

V této práci se využívá také míra emanace radonu  $[E] = \text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ .

### 2.2.1 Aktivita

#### 2.2.1.1 Vztahy pro odvození aktivity:

Aktivita je definována touto rovnicí (1),

$$A = -\frac{\delta N}{\delta t} \quad (1)$$

kde  $\delta N$  je počet přeměněných částic za čas  $\delta t$  [Majer]. Aktivitou se tedy rozumí úbytek radioaktivních jader za jednotku času. Při předpokladu, že každou jednu radioaktivní přeměnu provází uvolnění ionizující částice, dá se za pomoci různých měřicích metod velikost aktivity určovat.

Aktivitu lze také vyjádřit vztahem (2),

$$A = \lambda N \quad (2)$$

kde  $N$  je počet přeměněných jader a  $\lambda$  je přeměnová konstanta radionuklidu ( $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}}$ ).

Díky tomu je možné dosadit rovnici (2) do vztahu (1) a tím získat rovnici (3)

$$-\frac{\delta N}{\delta t} = \lambda N \quad (3)$$

Řešením této diferenciální rovnice je pak (4)

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Po vynásobení obou stran rovnice přeměnovou konstantou  $\lambda$ , vzniká (5)

$$N \cdot \lambda = N_0 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Díky vztahu (2) je možné napsat rovnici (6)

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (6)$$

kde  $A$  je aktivita radionuklidu v čase  $t$  a  $A_0$  je aktivita radionuklidu v čase  $t = 0$ . [6]

### ***Model konstantního přísunu a konstantní intenzity větrání:***

Nejjednodušší popis chování radonu ve stavbách využívá model konstantního přísunu a konstantní intenzity větrání. Podmínka konstantního přísunu je splněna v případě uvolňování radonu ze stavebního materiálu, kde je konstantním zdrojem radonu jeho mateřský nuklid  $\text{Ra}^{226}$ . Přísun emanací koncentraci, respektive aktivitu radonu, v místnosti zvyšuje a konstantní intenzita větrání pak aktivitu snižuje. Pro aktivitu platí vztah (7)

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} + \frac{A_p}{(\lambda + k)} \cdot (1 - e^{-(\lambda+k) \cdot t}) \quad (7)$$

$A_p$  je v rovnici konstantní přísun aktivity radonu ( $[A_p = Bq \cdot h^{-1}]$ ) a  $k$  je intenzita větrání ( $[k] = h^{-1}$ ). V případě podmínek při experimentu v této práci se  $k = 0$ . A zároveň tak i člen rovnice  $A_0 \cdot e^{-\lambda t} = 0$ . Rovnici je tedy možné přepsat do tvaru (8)

$$A(t) = \frac{A_p}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \quad (8)$$

Po roznásobení závorky vznikne rovnice (9)

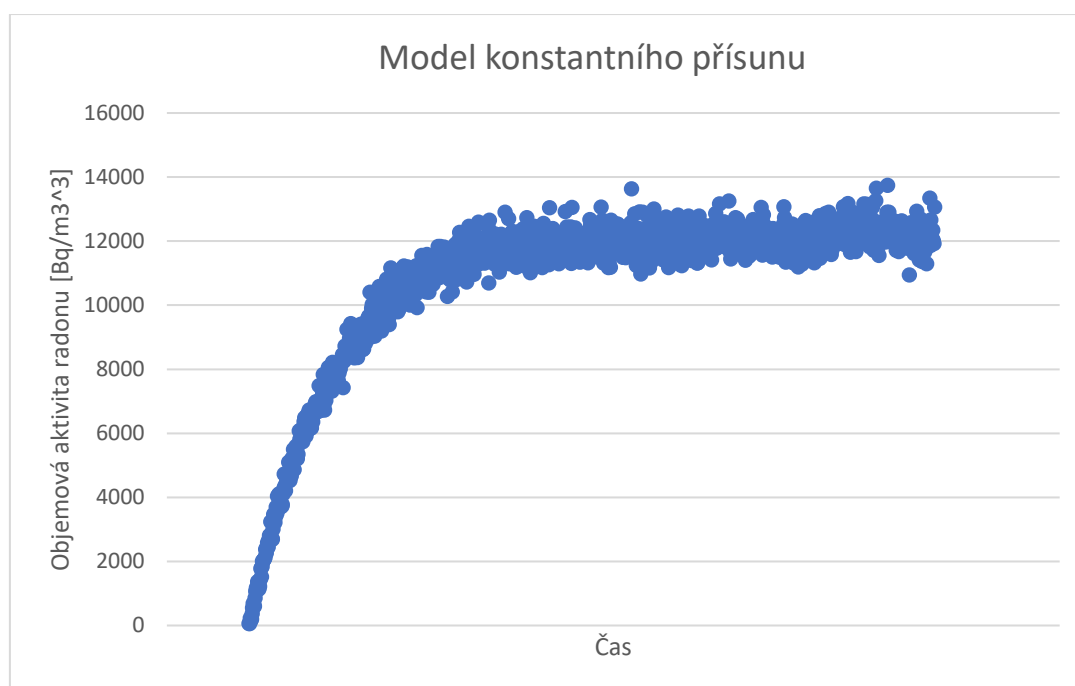
$$A(t) = \frac{A_p}{\lambda} - \frac{A_p}{\lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (9)$$

kteřá popisuje nárůstovou funkci při konstantním přísunu a nulovém, či zanedbatelném odsunu radonu. Tato funkce platí pouze pro nárůst hodnot objemové aktivity radonu – tedy nepočítá s aktivitami jeho dceřiných produktů.

Po uplynutí dostatečného času, dosahuje funkce víceméně rovnovážného stavu, kdy na každou jednu přeměněnou částici radonu je uvolněna další z měřeného vzorku. Tuto rovnovážnou objemovou aktivitu radonu lze popsat vztahem (10)

$$a_\infty = \frac{A_p}{\lambda \cdot V} \quad (10)$$

kde  $a_\infty$  je objemová aktivita radonu v rovnovážném stavu ( $[a_\infty] = Bq \cdot m^{-3}$ ) a  $V$  je objem prostoru, do kterého radon emanuje.



Graf 1td – příklad funkce vztahu (10), popisující nárůst aktivity radonu pro model konstantního přísunu s nulovou intenzitou větrání. Data pocházejí z měření škvárobetonu radonovým detektorem Airthings Corentium pro v emanační nádobě.

Pro výpočet přísunu aktivity radonu ze stavebního materiálu slouží upravená rovnice (11).

$$A_p = a_\infty \cdot \lambda \cdot V \quad (11)$$

### 2.2.2 Míra emanace radonu

Radon se často uvolňuje z materiálů obsahujících sloučeniny s jeho mateřským nuklidem a uniká z materiálu do plynného prostředí. Tento únik je nazýván emanací.

Emanace radonu probíhá z každého materiálu obsahujícího radionuklidy uran-radiové rozpadové řady. Míra emanace závisí na mnoha vlastnostech materiálu. Byla již zmíněna plocha, ze které radon emanuje, a poréznost materiálu. Mezi další parametry ovlivňující emanaci patří např. vlhkost materiálu nebo okolní tlak. Míra emanace radonu se dá odvodit z rovnice (12),

$$a = a_0 \cdot e^{-\lambda t} + \frac{E \cdot s}{\lambda \cdot V} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (12)$$

kde  $a$  je výsledná objemová aktivita radonu ( $Bq \cdot m^{-3}$ ),  $a_0$  je původní objemová aktivita radonu před emanací radonu z měřeného vzorku ( $Bq \cdot m^{-3}$ ),  $\lambda$  je přeměnová konstanta radonu ( $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ ),  $E$  je míra emanace radonu [ $Bq \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ],  $s$  je plocha

vzorku a  $V$  je objem nádoby (prostoru), do které vzorek emanoval. Tato rovnice se dá dále upravovat do následujících tvarů (13) a (14). V případě tohoto měření je původní koncentrace radonu v nádobě nulová, proto je možno člen  $a_0 \cdot e^{-\lambda t}$  odebrat a může se zapsat rovnice (13)

$$a = \frac{E \cdot s}{\lambda \cdot V} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (13)$$

K dalšímu zjednodušení rovnice je možné uplatnit Taylorův rozvoj. Po této úpravě se dostává rovnice (14) v následujícím tvaru

$$a = \frac{E \cdot s \cdot t}{V} \quad (14)$$

Ze které pak lze míru emanace radonu vyjádřit jako (15)

$$E = \frac{a \cdot V}{s \cdot t} \quad (15)$$

Poslední dva vztahy (13) a (14) nelze použít na popis celé funkce. Je možné ji použít pro hodnotu koncentrace funkce při poměrně nízkém  $t$ . [4].

Tato práce však vychází z modelu konstantního přísunu a konstantní intenzity větrání a ze vztahu (16)

$$A_p = a_\infty \cdot \lambda \cdot V \quad (16)$$

Z této rovnice plyne vztah pro výpočet konstantního přísunu radonu ( $[A_p = Bq \cdot h^{-1}]$ ).

Ze vztahu (15) je patrné, že jednotky popisující míru emanace radonu jsou  $[E] = [Bq \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}]$ . Po vydělení rovnice (16) plochou měřeného vzorku ( $s$ ), vznikne rovnice pro výpočet míry emanace vzorku podle vztahů (17) a (18)

$$\frac{A_p}{s} = \frac{a_\infty \cdot \lambda \cdot V}{s} \quad (17)$$

$$E = \frac{a_\infty \cdot \lambda \cdot V}{s} \quad (18)$$

Toto je vztah pro výpočet míry emanace radonu z objemové aktivity radonu v rovnovážném stavu používaný pro potřeby této práce.

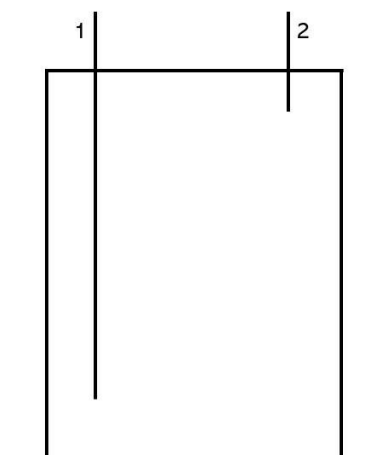
## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Příprava měření

#### 3.1.1 Příprava emanační nádoby

Byla použita kovová emanační nádoba válcového tvaru o objemu  $27\,344\text{ cm}^3$  s možností odejmutí vrchní části nádoby od její podstavy. Průměr podstavy nádoby je větší než průměr vrchní části válce. Vrchní část je na podstavu připevněna sérií vrutů, které procházejí vyvrtanými dírami na spodku vrchní části. Na tyto vruty pak byly připevněny matky na utažení, aby se zajistil minimální únik vzduchu.

Na neodnímatelné víko byly připevněny dva kohouty. Kohout 1 byl prodloužen do spodní části vnitřního prostoru komory a ten druhý prodloužen nebyl (Obr. 1). To bylo z důvodu rozdílných hmotností dvou izotopů radonu. Při větší koncentraci  $\text{Rn}^{220}$  by prodloužená část kohoutu 1 nasávala větší objem izotopu  $\text{Rn}^{220}$  než  $\text{Rn}^{222}$ , čímž by mohla vzniknout chyba v měření hodnot objemové aktivity radonu.



Obr. 1: Nákres emanační nádoby.

1 – Kohout 1

2 – Kohout 2

Před vložením vzorku do emanační komory bylo potřeba emanační komoru dobře vyčistit a vydezinfikovat, aby nic nezkreslovalo výsledné hodnoty objemové aktivity

radonu. Po vložení vzorku na podstavu komory byla přiložena vrchní část. Na vruty byly postupně přidávány vždy protilehlé matky, aby nevznikaly rozdíly v utažení, a musely být pečlivě utaženy, aby byl možný únik vzduchu co nejmenší.

### 3.1.2 Příprava měřeného vzorku

Vzorek byl před vložení do emanační komory podrobně změřen, aby byl znám povrch, ze kterého bude radon emanovat. Poté byl umístěn na podstavu emanační komory na malé podstavce, aby byl co možná největší povrch v kontaktu se vzduchem (Obr.2).

V této práci byly využity dva vzorky. Vzorek rynholeckého škvárobetonu byl využit k pokusnému měření nárůstu hodnoty objemové aktivity radonu. U tohoto vzorku proto nebylo potřeba zjišťovat jeho rozměry. Vzorek plynosilikátu byl v práci využit pro sestavení aparatury pro uspořádání průtokového měření objemové aktivity radonu. Plynosilikát byl kvádrového tvaru a jeho rozměry byly:

$$a = 17,4 \text{ cm}$$

$$b = 11,3 \text{ cm}$$

$$c = 18,8 \text{ cm.}$$

Jeho povrch byl  $s = 1472,36 \text{ cm}^2$ . Vzorek byl v emanační nádobě postaven na dvě měděné trubičky jako podstavce.



Obr. 2: Příprava měřeného vzorku

## 3.2 Použité metody

### 3.2.1 Metoda ručních odběrů plynného vzorku

#### 3.2.1.1 Popis metody

Pro měření objemové aktivity radonu ručními odběry byl používán systém RM-2 s elektrometrem ERM-3 a ionizačními komorami o objemu 250 ml. Do komor je odebíráno 150 ml plynného vzorku, tedy v této práci jde o vzduch z emanační nádoby, který je poté elektrometrem změřen.

#### 3.2.1.2 Průběh měření

Před měřením samotným bylo nutné změřit hodnotu objemové aktivity radonu přirozeného pozadí ionizační komory.

Pokud by pozadí bylo příliš vysoké, mohlo by to ovlivnit výsledné měření OAR vzorku. Byly používány ionizační komory s přirozeným pozadím do  $1,5 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Ionizační komory byly evakuovány a uzavřeny tak, aby před odběrem nevnikal do komory žádný vzduch. Z emanační nádoby bylo odebráno 150 ml plynného vzorku plastovou injekční stříkačkou, jenž byl přes silikonovou hadičku vpuštěn do ionizační komory.

Zbylý tlak v ionizační komoře byl vyrovnán nasátím okolního vzduchu do komory. Pro měřenou hodnotu objemové aktivity radonu není rozdíl, zda je kohoutek na ionizační komoře uzavřený nebo otevřený, protože by se vzduch v ionizační komoře a mimo ni neměl mísit. Odběry z emanační nádoby probíhaly z obou kohoutů, z každého do zvláštní ionizační komory. Naplněné ionizační komory pak byly po uplynutí 15 minut měřeny elektrometrem ERM-3 (Obr. 3).



Obr. 3: Měření plynného vzorku elektrometrem ERM3

Naměřená hodnota mohla být ovlivněna přítomností dceřiných produktů radonu. Byla proto provedena vybraná metoda, kdy odebíraný vzduch putoval přes filtr pevných částic, která byla následně porovnána s výsledky získanými ze stejného vzorku metodou, která filtr nevyužívala. Výsledky se od sebe výrazně nelišily. Dceřiné produkty radonu se nejspíše přichycují na stěny emanační nádoby a na vzorek a při odběru jich není do stříkačky nabráno tolik, aby výsledek ovlivnily. Pro zajištění přesnosti měření tedy nebylo nutné filtr pevných částic používat.

### 3.2.2 Metoda měření za pomoci radonových sond

#### 3.2.2.1 Popis metody

Pro kontinuální měření objemové aktivity radonu bylo měřeno dvěma monitory, bezdrátovou radonovou sondou SIGFOX TSR 4S a detektorem radonu Airthings Corentium Pro. Tyto monitory byly vloženy do vnitřku emanační nádoby k měřenému vzorku před jejím uzavřením.

Bylo nutné nastavit polohu detektorů tak, aby místa vstupu vzduchu do měřicích komor v obou detektorech byla v kontaktu se vzduchem v emanační komoře. Kdyby

byla tato místa zastíněna a nebyla v kontaktu se vzduchem, mohly by se vyskytnout chyby v naměřených hodnotách.

V průběhu nárůstu emanační křivky nesměly být detektory vyndány z emanační komory a komora nesměla být otevřena. Po ukončení měření a vyvětrání emanační nádoby byly sondy od vzorku odebrány. Radonová sonda SIGFOX TSR 4S provádí měření pravidelně jednou za půl hodiny. Díky těmto automatickým měřením jsou sondy schopny v čase vytvářet nárůstové křivky.

Při měření monitoru vzniká prodleva aktuálnosti dat, která je způsobena tím, že sondy měří objemovou aktivitu vzduchu v měřicí komoře, která je zabudovaná uvnitř detektoru a do níž se vzduch dostává difúzí. U detektoru Airthings Corentium Pro činí tato prodleva 30 minut a u TSR 4S je to kolem dvou hodin (prodleva závisí na rozměrech otvorů, kterými vzduch do měřicích komory vstupuje).

Hodnoty z detektoru radonu Airthings Corentium Pro byly pro potřeby práce využívány jako referenční hodnoty, se kterými byly porovnávány hodnoty z uspořádání zahrnujícího využití monitoru Rad7. Výhodou radonové sondy SIGFOX TSR 4S je, že je připojena na síť SIGFOX a průběžné výsledky lze sledovat online v reálném čase. Tato sonda byla pro potřeby práce využívána jako kontrolní vzhled do aparatury kvůli kontrole průběhu měření.

### 3.2.2.2 Průběh měření

#### ***Uspořádání bez připojení radonového detektoru RAD7:***

Před uzavřením sond do emanační nádoby byly pro lepší čitelnost dat při vyhodnocení sondy na půl hodiny vyvětrány na venkovním vzduchu. Poté byly sondy do nádoby uzavřeny spolu se vzorkem plynosilikátu tak, aby byly detektory obou sond v kontaktu se vzduchem uvnitř nádoby (Obr. 4).



Obr. 4: Umístění sond a vzorku do emanační nádoby

V průběhu dalších několika týdnů byl průběh nárůstu sledován na datech získaných ze sondy TSR 4S. Poté, co bylo jisté, že se v emanační nádobě ustálila rovnovážná hodnota, byly sondy vyjmuty a data z nich byla stažena a převedena to tabulek ve formátu .xlsx.

#### ***Uspořádání s připojením radonového detektoru RAD7:***

Měření v uspořádání s připojením Rad7 aparatury se nelišilo ve využití sond od postupu při měření sond bez uspořádání RAD7.

### 3.2.3 Metoda měření s využitím detektoru radonu RAD7

#### 3.2.3.1 *Popis metody*

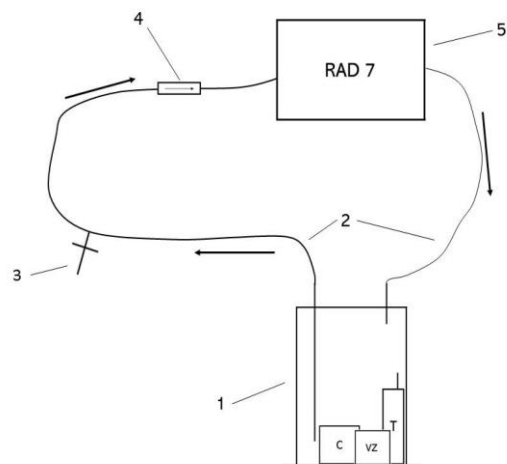
Pro uspořádání kontinuálního měření objemové aktivity radonu byl využit detektor radonu DurrIDGE Rad7, který je schopen provádět kontinuální měření objemové aktivity radonu.

#### 3.2.3.2 *Popis uspořádání aparatury*

Pro vytvoření upořádání aparatury pro kontinuální měření objemové aktivity radonu byly využity následující komponenty:

- a. V kapitole 3.1.1 popisovaná emanační nádoba s objemem  $27\,334\text{ cm}^3$  se vzorkem s detektorem radonu Airthings Corentium Pro a sondou TSR 4S,
- b. Silikonová hadička pro vedení vzduchu s 4 mm průměrem,
- c. Plastový kohout pro umožnění ručních odběrů,
- d. Filtr pevných částic s jednosměrným průtokem
- e. detektor radonu Rad7.

Na emanační nádobu na kohout 1, který je prodloužen do spodku vnitřní části emanační nádoby, byla připevněna silikonová hadička s kohoutem pro ruční odběry a filtrem pevných částic před vstupem do detektoru Rad7. Z Rad7 pak vycházela další silikonová hadička, která byla napojena zpět do emanační komory (Obr. 5 a 6). Vzduch z emanační nádoby byl tahán rychlostí  $1\text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$  do detektoru Rad7 v pořadí komponentů zmíněném výše a popsáném na (Obr. 5).



Obr. 5: Nákres kontinuálního uspořádání aparatury pro měření objemové aktivity radonu. Směr proudění vzduchu je označeno šipkami.

1 – Emanační nádoba

2 – Silikonová hadička s 4 mm průměrem

3 – Kohout pro umožnění ručního odběru

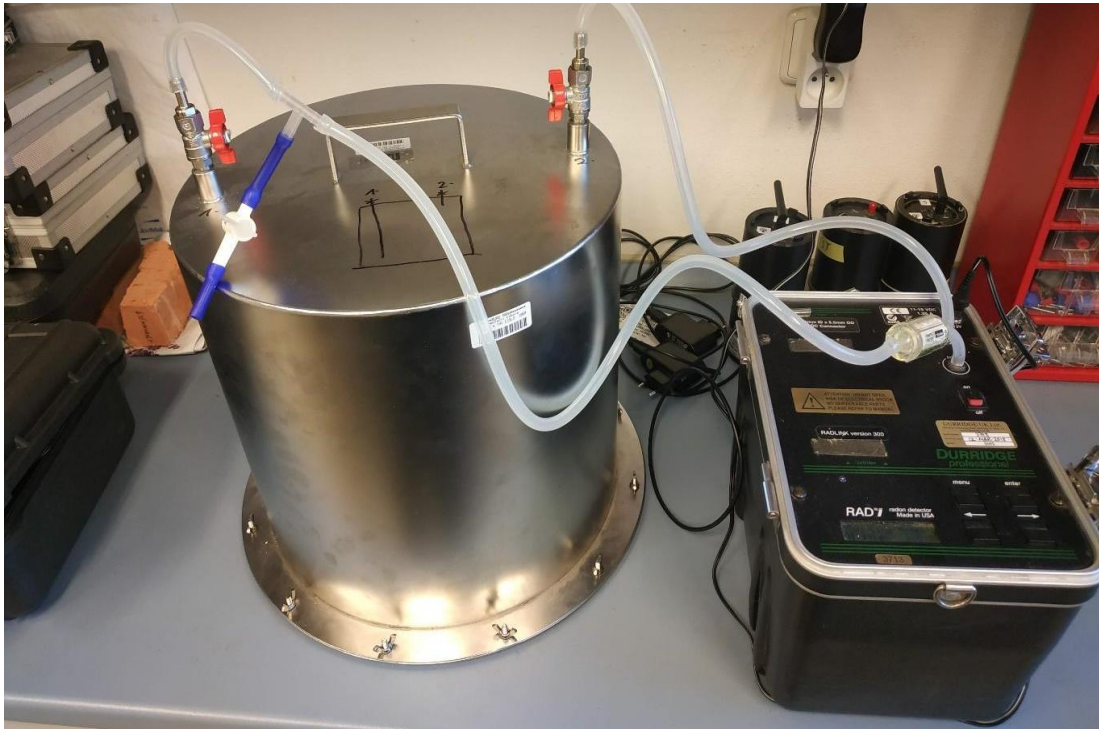
4 – Filtr pevných částic s jednosměrným průtokem

5 – Detektor radonu Rad7

VZ – Vzorek

C – Detektor radonu Airthings Corentium Pro

T – Radonová sonda TSR 4S



Obr. 6: Fotografie kontinuálního uspořádání aparatury pro měření objemové aktivity radonu

### 3.2.3.3 Průběh měření

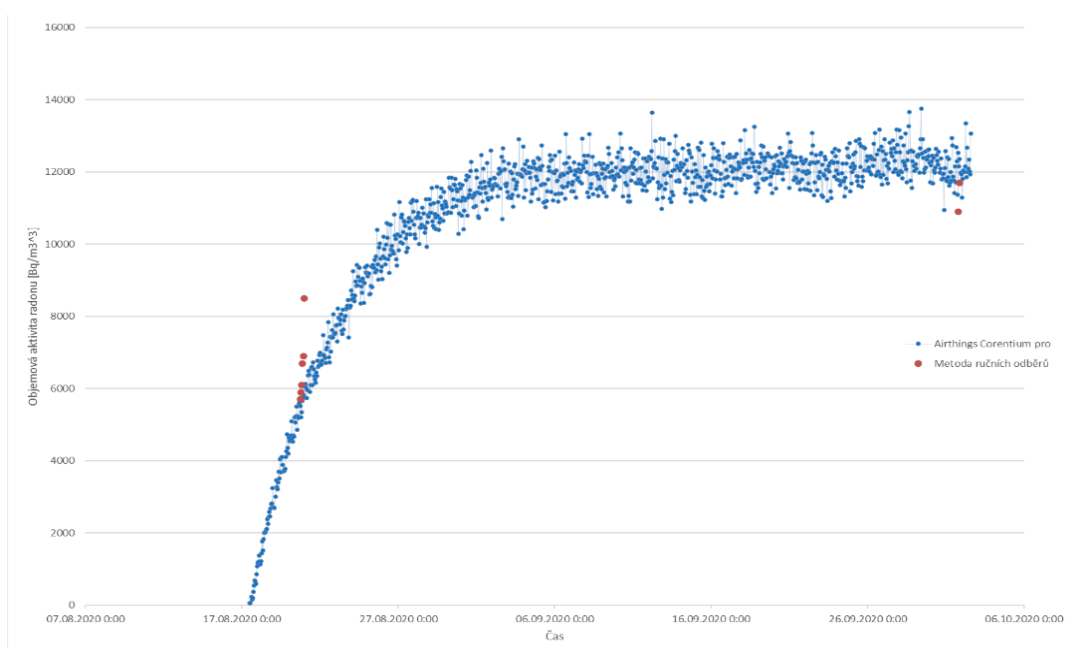
Nejprve byla sestavena aparatura a zapojeny všechny komponenty. Dále byly uvolněny kohouty 1 a 2 na emanační nádobě. Rad7 byl nastaven a spuštěn na režim WEEK TEST. V průběhu měření byl stav nárůstu hodnot kontrolován na datech získaných ze sondy TSR 4S. Po ukončení měření byla aparatura rozebrána a výsledky z detektoru Rad7 převedeny do formátu .xlsx.

## 4 VÝSLEDKY

### 4.1 Uspořádání s využitím radonového detektoru Airthings Corentium Pro

#### 4.1.1 Rynholecký škvárobeton

Nejprve bylo testováno využití detektoru radonu Airthings Corentium Pro na vzorku rynholeckého škvárobetonu. Pokus jasně ukázal na výhodu pravidelných měření radonového detektoru oproti náročným ručním odběrům. Nárůstová křivka je dobře vidět na grafu 1.

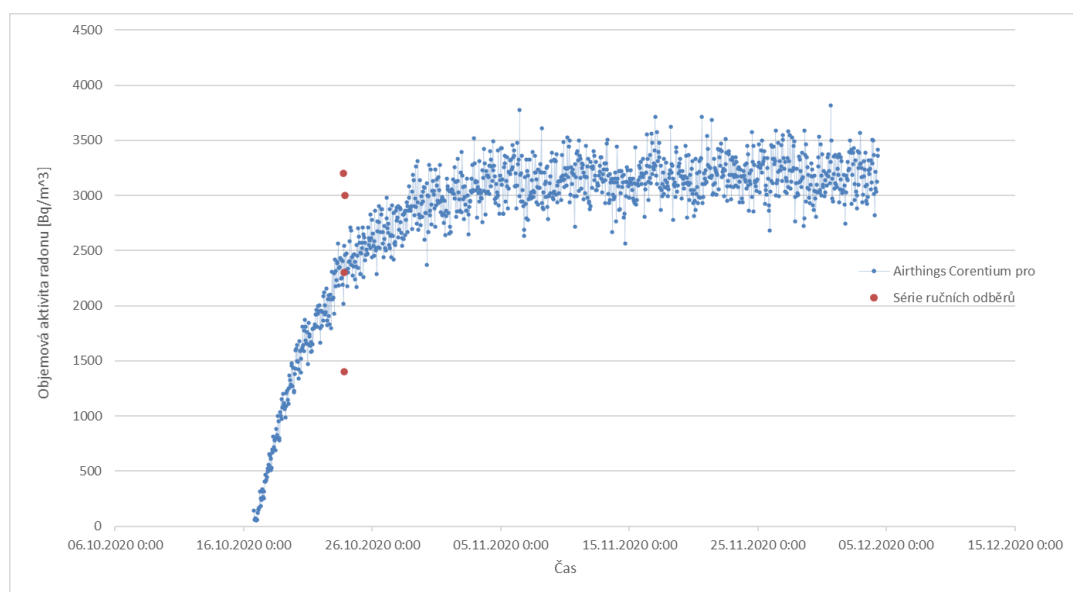


Graf 1: Hodnoty objemové aktivity radonu v čase naměřené na vzorku rynholeckého škvárobetonu detektorem radonu Airthings Corentium Pro a ručními odběry v testovacím měření kontinuálního uspořádání.

#### 4.1.2 Plynosilikát

Pro účely tvorby průtokového měření byl využit vzorek plynosilikátu. Nejprve byl měřen v uspořádání bez využití průtokového měření detektorem radonu RAD7. Toto měření bylo pro potřeby práce využito jako referenční uspořádání. Měření objemové aktivity radonu bylo prováděno dvěma monitory, bezdrátovou radonovou sondou SIGFOX TSR 4S a detektorem radonu Airthings Corentium Pro a také jednou sérií ručních odběrů.

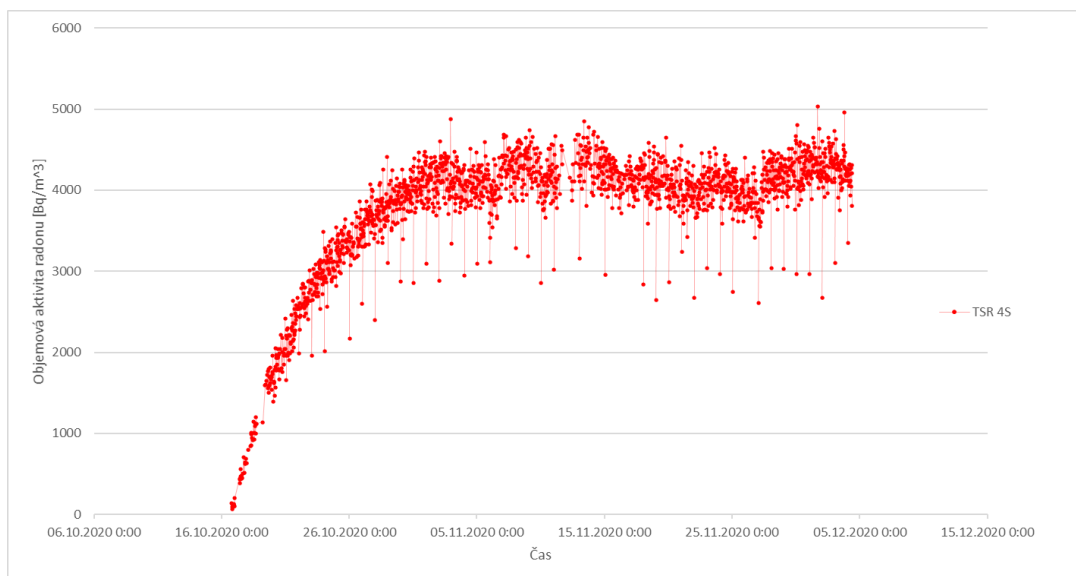
Hodnoty naměřené detektorem radonu Airthings Corentium Pro a ručními odběry jsou patrné z grafu 2.



Graf 2: Hodnoty objemové aktivity radonu v čase naměřené na vzorku plynosilikátu detektorem radonu Airthings Corentium Pro a ručními odběry v uspořádání bez zapojení detektoru RAD7

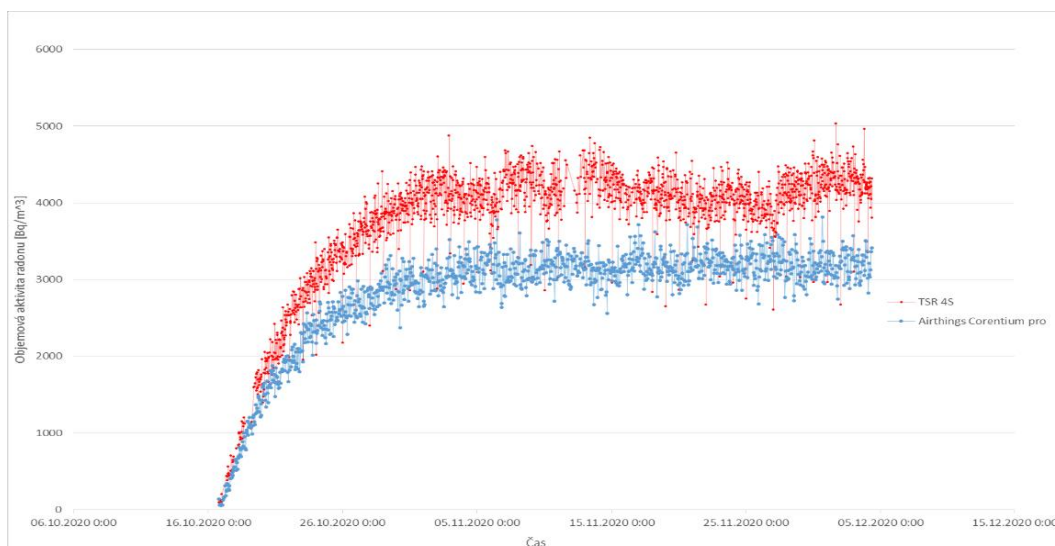
Z grafu 2 je také vidět, že ruční odběry nejsou příliš přesnou metodou kvůli vysoké relativní směrodatné odchylce ( $S_r = 33,011 \%$ ). Radioaktivní přeměna je ale náhodný jev, proto nemůže několik málo naměřených hodnot poskytnout dostatečná data. Nahodilost radioaktivní přeměny se projevuje také v hodnotách naměřených detektorem radonu Airthings Corentium Pro.

Graf 3 ukazuje hodnoty naměřené bezdrátovou radonovou sondou SIGFOX TSR 4S.



Graf 3: Hodnoty objemové aktivity radonu v čase naměřené na vzorku plynosilikátu bezdrátovou radonovou sondou SIGFOX TSR 4S v uspořádání bez zapojení detektoru RAD7

Graf 4 ukazuje porovnání hodnot naměřených detektorem radonu Airthings Corentium Pro a bezdrátovou radonovou sondou SIGFOX TSR 4S, kdy je TSR 4S zcela mimo referenční hodnoty naměřené Airthings Corentium Pro.



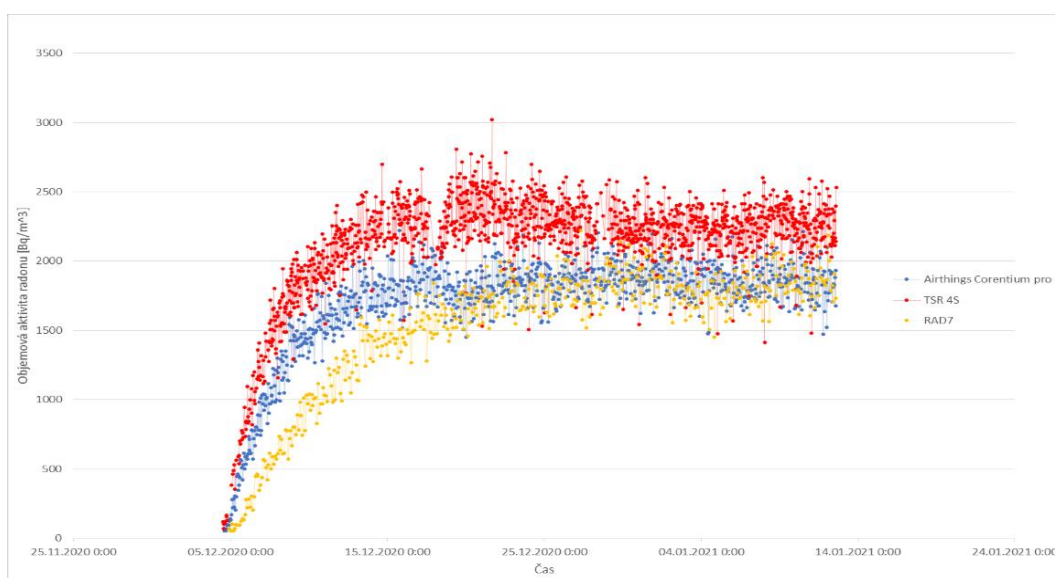
Graf 4: Porovnání hodnot objemové aktivity radonu naměřených na vzorku plynosilikátu detektorem radonu Airthings Corentium Pro a bezdrátovou radonovou sondou SIGFOX TSR 4S v uspořádání bez zapojení detektoru RAD7

Začátek nárůstových křivek obou detektorů jsou na Grafu 4 ze začátku stejné. Přesto je nutné označit měření sondou SIGFOX TSR 4S za nepřesné.

## 4.2 Průtokové uspořádání s využitím detektoru radonu RAD7

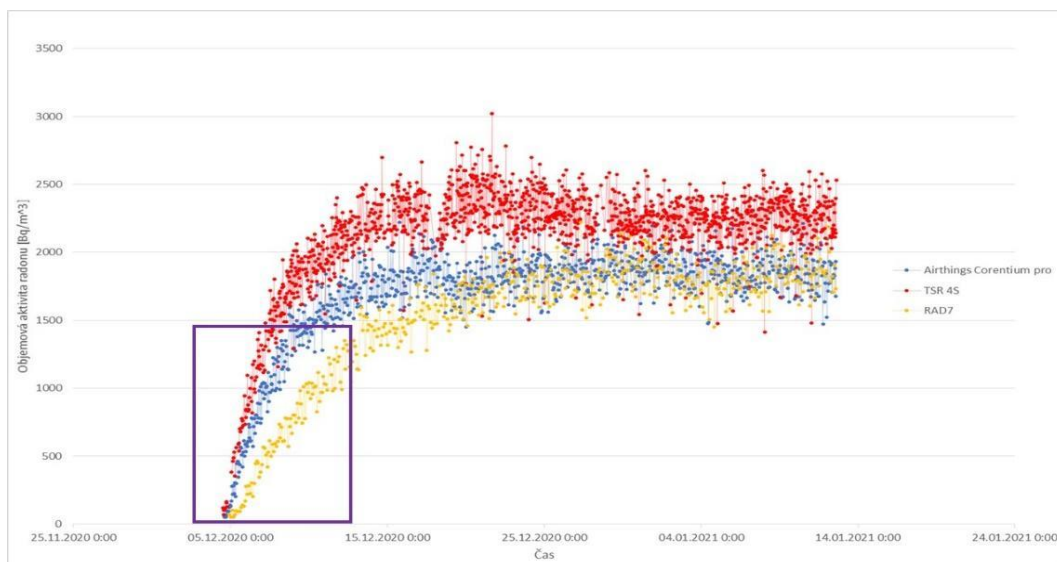
V průtokovém uspořádání byl využit vzorek plynosilikátu. Průtokové uspořádání bylo touto prací testováno a hodnoty z něj byly porovnávány s hodnotami v uspořádání bez využití detektoru RAD7.

Všechny tři detektory v průtokovém uspořádání naměřily předpokládaný nárůst hodnot objemové aktivity radonu v čase, který je charakteristický pro model konstantního přísunu a konstantní intenzity větrání. Hodnoty se také po čase ustálily a v emanační nádobě tedy panoval rovnovážný stav. Tyto charakteristiky lze vidět na grafu 5, který porovnává měření sond Airthings Corentium Pro, TSR 4S a radonového detektoru RAD7.



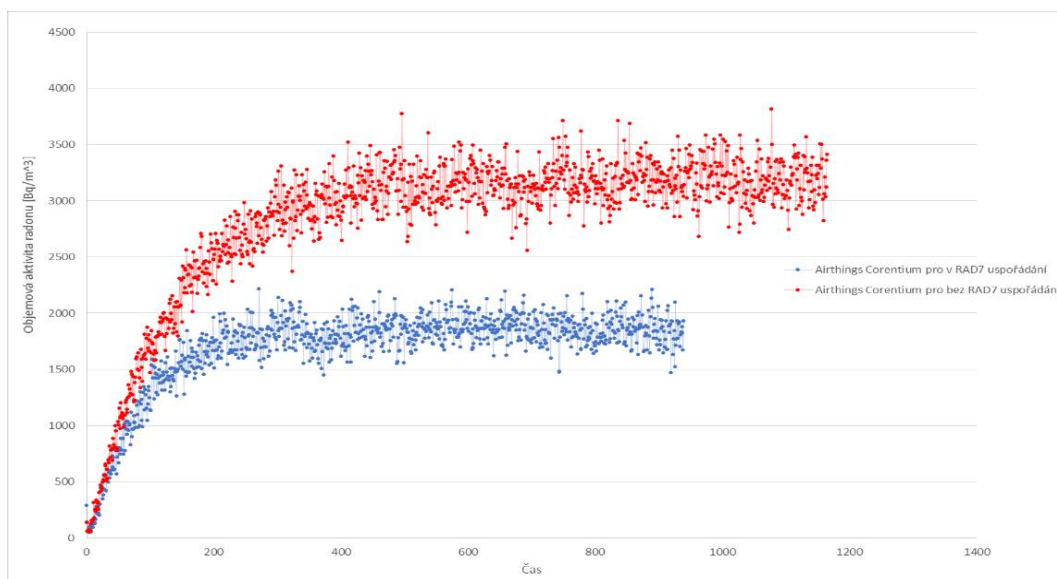
Graf 5: Hodnoty objemové aktivity radonu v čase naměřené na vzorku plynosilikátu detektorem radonu Airthings Corentium Pro v porovnání s bezdrátovou radonovou sondou SIGFOX TSR 4S a s detektorem radonu RAD7 v průtokovém uspořádání s využitím detektoru RAD7

Hodnoty objemové aktivity radonu naměřené detektorem radonu RAD7 v rovnovážném stavu jsou sice velmi blízké hodnotám naměřeným detektorem radonu Airthings Corentium Pro, ale je patrný rozdíl v počátku nárůstu křivky, kdy hodnoty na monitoru RAD7 jsou v daném čase nižší než hodnoty odečtené z detektoru Airthings Corentium Pro. To je zřejmé z grafu 5.1td, zčásti ohraničené fialovým obdélníkem.



Graf 5.1td: Zvýrazněný úsek hodnot objemové aktivity radonu v čase grafu 5

Porovnání výsledků z detektoru Airthings Corentium Pro pro obě uspořádání ukazuje velký rozdíl mezi hodnotami objemové aktivity radonu naměřenými v obou testovaných uspořádáních, jak je vidět z grafu 6.



Graf 6: Srovnání hodnot naměřených detektorem radonu Airthings Corentium Pro v uspořádání bez zapojení detektoru RAD7 a v průtokovém uspořádání s využitím detektoru RAD7

## 5 ZÁVĚR

V průběhu práce bylo provedeno několik měření objemové aktivity radonu dvěma různými uspořádáními a třemi různými metodami na dvou vzorcích stavebních materiálů. Také bylo vytvořeno kontinuální uspořádání s využitím radonové sondy Airthings Corentium Pro a poskládána aparatura pro průtokové měření objemové aktivity radonu za pomoci detektoru RAD7.

Hodnoty měření vytvořeného průtokového uspořádání byly porovnány s hodnotami naměřenými bez zapojení aparatury průtokového uspořádání. Aparatura kontinuálního měření s využitím radonové sondy Airthings Corentium Pro se prokázala jako vhodná metoda. Ukázalo se, že hodnoty naměřené vytvořeným průtokovým uspořádáním se od referenčních hodnot lišily. To bylo pravděpodobně způsobeno únikem měřeného plynu. Aparatura mohla být málo těsná na kontaktech jednotlivých silikonových hadiček a vstupech do detektoru, emanační nádoby, filtru pevných částic nebo u kohoutu sloužícího pro ruční odběry.

Výsledky práce lze shrnout v odpovědích na otázky položené v úvodu.

*a. Poslouží kontinuální metoda měření objemové aktivity radonu využívající radonové detektory jako vhodná alternativa pro metodu ručních odběrů?*

Ano. Tato aparatura byla prověřena a nejsou problémy v jejím uspořádání. Díky pravidelným automatickým měřením je možné vidět matematicky přesný nárůst hodnot objemové aktivity radonu podrobněji, než by bylo možné dosáhnout ručním měřením. Pro další měření objemové aktivity radonu uvolněných ze stavebních materiálů v použití aparatury emanační nádoby je metoda kontinuálního měření objemové aktivity radonu využívající radonové detektory doporučena.

*b. Jakým způsobem je vhodné detektory do aparatury umístit, aby byly dosaženy přesné hodnoty?*

Detektory je třeba do aparatury umístit tak, aby byly vstupy do jejich měřících komůrek v kontaktu se vzduchem. Dále je pak doporučeno využít radonovou sondu TSR 4S pro sledování stavu nárůstu křivky online. Výsledky z ní se však neshodují s referenčním detektorem Airthings Corentium Pro.

*c. Je průtokové uspořádání se zapojením Rad7 do emanační komory dostatečná alternativa pro měření objemové aktivity radonu v porovnání s uspořádáním se sondami a ručními odběry?*

Není. Uspořádáním je sice možné provést měření shodující se s daty pořízenými referenčními sondami v daném průtokovém uspořádání, ale při měření nemusí být dosaženo správných výsledků. Vzhledem k pozorovanému rozdílu mezi hodnotami mezi oběma měřeními je průtokové uspořádání nedostatečná alternativa.

*d. Jakým způsobem je do aparatury potřeba Rad7 zapojit, aby bylo uspořádání úspěšné?*

Pro dosažení správných výsledků by bylo potřeba naprosto eliminovat možnost úniku plynného vzorku, tedy odstranit komponenty v aparatuře, kde by vzduch mohl unikat. Většina komponentů je však nutná pro přesnost měření, proto to není možné. Dalším možným řešením by mohlo být důkladnější utěsnění kontaktů hadičky a komponentů. Vzhledem ke špatné propustnosti silikonu je obtížným úkolem najít materiál, který by unik plynu snížil. Posledním možným řešením by mohla být výměna materiálu hadičky.

*e. Jaký je optimální postup pro výpočet míry emanace ze změřené objemové aktivity radonu?*

Optimálním postupem je shledána rovnice vycházející z modelu konstantního přísunu a konstantní intenzity větrání odvozena v kapitole Teoretický úvod. Nejlépe totiž popisuje podmínky v aparatuře a emanační nádobě.

Pro možné navázání na práci s průtokovým uspořádáním aparatury je doporučeno vyhledat místa s únikem vzduchu a unik co nejvíce snížit. V případě, že by nešlo unik zcela snížit, je třeba při výpočtu míry emanace radonu počítat s konstantní intenzitou větrání, která představuje unik plynu.



## LITERATURA

- [1] [online]. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- [2] [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz>
- [3] [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/Letak-Domy-typu-START-1.pdf>
- [4] FOURNIER, F., a kol. *Simulation of Radon Transport through Building Materials: Influence of the Water Content on Radon Exhalation Rate*. 2005.
- [5] KABRT, F., a kol. *INTRODUCTION AND TESTING OF A SIMPLIFIED METHOD FOR THE EVALUATION OF THE RADON EMANATION*. 2017.
- [6] MAJER, Vladimír. *Základy jaderné chemie: vysokoškolská příručka*. 2. přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [7] [online]. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace>
- [8] KLENER, Vladislav. *Hygiena záření*. Praha: Avicenum, 1988.
- [9] *Směrnice rady 2013/59/euroatom, kterou se stanoví základní bezpečnostní standardy ochrany před nebezpečím vystavení IZ*. In: . 2014, ročník 2013, číslo 59.
- [10] [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/vyskyt-radonu-v-ceske-republice/jak-jsme-na-tom-s-radonem>
- [11] [online]. [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz/obecne-informace/radon-v-dome/vstup-radonu-do-objektu-a-jeho-chovani-uvnitř>