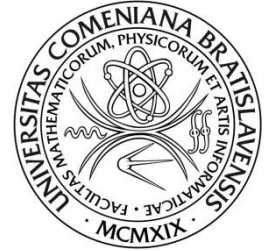




**Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta Matematiky, Fyziky a Informatiky**



Mgr. Attila Moravcsík

Autoreferát dizertačnej práce

RADÓN V OVZDUŠÍ RODINNÝCH DOMOV, JEHO VARIÁCIE A METÓDY MERANIA

**na získanie akademického titulu philosophiae doctor
v odbore doktorandského štúdia:**

4.1.2 Všeobecná fyzika a matematická fyzika

Bratislava, 2015

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre jadrovej fyziky a biofyziky Fakulty matematiky, fyziky a informatiky, Univerzity Komenského v Bratislave.

Predkladateľ: Mgr. Attila Moravcsík
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského
Mlynská Dolina
842 48 Bratislava 4
Slovenská republika

Školiteľ: doc. RNDr. Karol Holý, CSc.

Oponenti: 1.
2.
3.

Obhajoba dizertačnej práce sa koná o h. pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou predsedom odborovej komisie

Študijný odbor: 4.1.2 Všeobecná fyzika a matematická fyzika

Študijný program: Environmentálna fyzika

na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, miestnosť

Predseda odborovej komisie:
prof. RNDr. Peter Babinec, CSc.
Katedra jadrovej fyziky a biofyziky
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského
Mlynská Dolina
842 48 Bratislava 4
Slovenská republika

Obsah

Úvod.....	4
1. Ciele dizertačnej práce.....	4
2. Radón v bytových priestoroch a harmonizácia jeho meraní v krajinách V4.....	4
3. Dosiachnuté výsledky.....	5
3.1. Meranie OAR v domoch.....	5
3.2. Testovanie modelu pre výpočet objemovej aktivity radónu v bytových priestoroch v reálnych podmienkach.....	8
3.3. Radónová diagnostika rodinného domu v lokalite Studienka.....	11
3.4. Radónová komora na testovanie stopových detektorov.....	16
3.5. Dvojfiltrový detekčný systém pre monitorovanie objemovej aktivity radónu.....	18
Záver.....	19
Zoznam použitej literatúry.....	22
Publikačná činnosť.....	23

Úvod

Otázka ochrany zdravia človeka pred ionizujúcim žiarením je v súčasnej dobe najviac diskutovanou témou. Podľa smernice rady EÚ 2013/59/EURATOM je potrebné v členských krajinách EÚ realizovať národné akčné plány na riešenie dlhodobých rizík vyplývajúcich z ožiarenia radónom [1]. Pre hodnoverné určenie efektívnych dávok od radónu, torónu a ich produktov premeny neexistuje stále dostatok poznatkov o dlhodobých úrovniach ich koncentrácie v domoch a ich vzťahu k podlažiu. Takéto poznatky sú predpokladom k úspešnému realizovaniu národných akčných plánov pre radón.

V práci sú prezentované výsledky jednoročného monitorovania objemovej aktivity radónu a torónu v ovzduší rodinných domov v 3 lokalitách na Slovensku, ich závislosť od podlažia a konštrukčných charakteristík domu. Získané výsledky sme porovnali s modelom popisujúcim koncentrácie radónu v domoch. V reálnych podmienkach sme študovali vplyv užívania rodinného domu na objemovú aktivitu radónu. Testovali sme dvojfiltrový detekčný systém na meranie objemovej aktivity radónu vo vonkajšom ovzduší.

1. Ciele dizertačnej práce

Ciele dizertačnej práce sú stanovené v súlade s potrebami riešenia úloh radónovej problematiky na Katedre jadrovej fyziky a biofyziky FMFI UK v Bratislave. Tieto sú zamerané na environmentálne aplikácie ^{222}Rn a jeho krátkožijúcich produktov premeny, ako aj na vedeckú podporu vnútroštátneho akčného plánu na riadenie dlhodobých rizík spôsobených ožiarením radónom. Toto druhé zameranie je realizované v ostatnom období hlavne v rámci spoločného projektu krajín V4 "Harmonizácia určovania radiačných dávok obyvateľstva od radónu".

Hlavnými cieľmi práce sú:

1. Testovanie odozvy stopových detektorov radónu a torónu určených pre radónový prieskum pobytových priestorov v laboratórnych a terénnych podmienkach.
2. Vyhodnotenie výsledkov meraní radónového prieskumu domov realizovaného v troch rôznych lokalitách Slovenska.
3. Získanie poznatkov o sezónnych zmenách objemových aktivít radónu a torónu v domoch v závislosti od meteorologických podmienok, typu a veku stavby, druhu podlažia a podobne, ako aj testovanie modelov ich popisu.
4. Vývoj a testovanie vysokocitlivých kontinuálnych metód merania objemovej aktivity radónu.

2. Radón v pobytových priestoroch a harmonizácia jeho meraní v krajinách V4

Radón v ovzduší pobytových priestorov spôsobuje vysokú radiačnú záťaž obyvateľstva a preto sa jeho meraniu venuje zvýšená pozornosť. V pobytových priestoroch v Európskej únii, radón každoročne spôsobuje približne 20 000 úmrtí na rakovinu pľúc [2]. Tento počet je zhruba 9% z celkového počtu úmrtí na rakovinu pľúc v EÚ a zhruba 2% z celkového počtu úmrtí na rakovinu.

Podľa smernice rady EÚ 2013/59/EURATOM je potrebné v členských krajinách EÚ realizovať národné akčné plány na riešenie dlhodobých rizík vyplývajúcich z ožiarenia

radónom. Ich realizácia bude vyžadovať koordinované postupy v rámci členských krajín EÚ.

Tak, ako vo väčšine štátov v miernom podnebnom pásme, aj na Slovensku boli uskutočnené screeningové merania objemových aktivít radónu v bytových priestoroch. Na základe týchto meraní boli vytvorené mapy radónovej záťaže jednotlivých regiónov [3].

Pri porovnávaní radiačnej záťaže sa môžu vyskytnúť rôzne problémy vyplývajúce z:

- používania rôznych detekčných metód rôznymi skupinami,
- použitia rôznych metód vyhodnocovania, z čoho vyplýva nejednoznačnosť výpočtu priemernej ročnej objemovej aktivity. Tým dochádza k problému s prechodom od nameraných objemových aktivít radónu k ohodnoteniu ročnej efektívnej dávky.

Na podporu plnenia národných akčných plánov a odstránenie vyššie spomenutých problémov vzišla v rámci krajín V4 (Slovensko, Česká republika, Poľsko a Maďarsko) iniciatíva na vytvorenie harmonizačných meraní, ktorá bola podporená Višehradským fondom.

V harmonizačnom protokole bol stanovený spôsob rozmiestnenia detektorov, dĺžka expozície a výber trojmesačného obdobia expozície v bytových priestoroch. Vo všetkých 4 krajinách sa použili rovnaké detektory typu Raduet od výrobcu Radosys. Tento stopový detektor je vhodný na súčasné meranie radónu aj torónu. Práve kvôli tomu sú výsledky použiteľné aj na torónový prieskum bytových priestorov. Exponované detektory vyhodnocoval výrobca, ktorý aj dodával všetky detektory. Detektory boli tvorené dvoma difúznymi komorami, v ktorých boli umiestnené stopové detektory CR-39. Jedna komora bola priepustná len pre radón, kým druhá komora obsahovala otvory na prepustenie aj torónu.

V rámci projektu sa mali vybrať lokality, kde sa očakávala zvýšená koncentrácia radónu v bytových priestoroch. Jedným z hlavných faktorov výberu lokality boli charakteristiky geologické podložia, ako aj koncentrácie radónu v pôdnom vzduchu. Na základe týchto kritérií sme na Slovensku vybrali nasledovné lokality: Záhorská Bystrica, oblasť Mochoviec a Ružomberok.

3. Dosiahnuté výsledky

3.1. Meranie OAR v domoch

V rámci vypracovania dizertačnej práce sme na Slovensku merali OAR a OAT v 3 lokalitách. Jednotlivé lokality sa nachádzali oblasti vysokého až stredného pôdneho radónového rizika. Monitorovanie OAR a OAT sme uskutočňovali spolu v 70 domoch v 4 trojmesačných meracích etapách počas 1 roka.

Vekové zastúpenie monitorovaných domov v jednotlivých lokalitách nebolo rovnaké. V lokalite Záhorskej Bystrice 47% monitorovaných domov bolo postavených po roku 2000, čo nám značne ovplyvnilo získané výsledky. Ďalšou monitorovanou oblasťou bolo okolie Mochoviec. V tejto lokalite sme si vybrali 2 dediny, Čifáre a Nevidzany. V týchto dedinách bolo vekové zastúpenie monitorovaných domov približne rovnaké. 68%

domov bolo postavených medzi rokmi 1950-1990. Podobné vekové zastúpenie monitorovaných domov sme mali aj v oblasti Ružomberka, kde 70% monitorovaných domov bolo postavených v období rokov 1950-1990.

Hlavným spoločným znakom v týchto lokalitách bolo, že OAR vykazovalo sezónne variácie s minimom v letnom období a maximom v zime. V niektorých monitorovaných domoch sme zaznamenali výraznejšie, inde slabšie variácie OAR. Napriek tomu, že zhruba 85% rozlohy Záhorskej Bystrice leží v oblasti vysokého pôdneho radónového potenciálu, priemerná ročná OAR bola na úrovni 105 Bq/m³. Nízka hodnota priemernej ročnej OAR mohla byť pravdepodobne spôsobená vysokým percentom nových domov v tejto lokalite. Napriek nízkej priemernej ročnej OAR sme v Záhorskej Bystrici našli 1 dom, v ktorom priemerná ročná OAR presahovala hodnotu 400 Bq/m³.

Lokalita Mochoviec leží v oblasti stredného radónového potenciálu. V jednotlivých dedinách sme, pravdepodobne kvôli prevahe starších domov, namerali najvyššie priemerné ročné OAR. Priemerná ročná OAR v Čifároch bola na úrovni 240,3 Bq/m³, v Nevidzanoch sme namerali 193,4 Bq/m³. V tejto lokalite len v 3 domoch priemerná ročná OAR nepresiahla hodnotu 100 Bq/m³, priemernú ročnú OAR vyššiu ako 400 Bq/m³ sme namerali v 5 domoch.

Ružomberok leží v oblasti stredného až nízkeho pôdneho radónového potenciálu. Priemerná ročná OAR bola na úrovni 162 Bq/m³. V tejto lokalite sme nenašli dom, v ktorom ročná OAR presiahla 400 Bq/m³.

Spolu s radónom sme monitorovali aj OAT. Ani v jednej z lokalít sme však nezaznamenali sezónnu variáciu torónu. Najnižšiu priemernej ročnú OAT sme namerali opäť v Záhorskej Bystrici (37,5 Bq/m³), najvyššie priemerné ročné OAT boli merané v Čifároch (52,8 Bq/m³) a Nevidzanoch (60,7 Bq/m³). V jednotlivých lokalitách, až na výnimku Čifár, sme určili pomer OAR/OAT zhruba rovnaké na úrovni 3. V Čifároch sme zistili pomer OAR/OAT 4,5.

Tabuľka 1: Porovnanie priemerných ročných OAR a OAT v jednotlivých lokalitách.

	OAR [Bq/m ³]	OAT [Bq/m ³]	OAR/OAT
Záh.Bystrica	105,0	37,5	2,8
Čifáre	240,3	52,8	4,6
Nevidzany	193,4	60,7	3,2
Ružomberok	162,0	53,1	3,1

Niektoré monitorované domy boli viacpodlažné alebo so suterénnymi miestnosťami, preto sme študovali závislosť OAR a OAT od umiestnenia monitorovanej miestnosti. V Záhorskej Bystrici sme zaznamenali pokles priemernej OAR od suterénu po vyššie poschodia (128,7 Bq/m³, 105,9 Bq/m³ a 90,9 Bq/m³). OAR vykazovala, okrem suterénu, na prízemí a vyšších poschodiach sezónne variácie. V Mochovciach najvyššie priemerné ročné OAR sme namerali na prízemí (230,1 Bq/m³). Najintenzívnejšie sezónne variácie OAR sme zaznamenali na prízemí, menej intenzívne sme zistili na vyšších poschodiach a v suteréne sme nezaznamenali sezónne variácie OAR. V Ružomberku boli

všetky monitorované miestnosti na prízemí, preto sme v tejto lokalite neskúmali závislosť OAR od umiestnenia miestnosti.

V prípade torónu sme ani v jednej z lokalít nezaznamenali sezónne variácie na jednotlivých poschodiach. Jedine v oblasti Mochoviec sme zaznamenali mierny pokles OAT od suterénu po vyššie poschodia (68,9 Bq/m³, 58,5 Bq/m³ a 44,3 Bq/m³). V Záhorskej Bystrici sme najnižšiu priemernú OAT namerali v suteréne, na prízemí a vyšších poschodiach bola priemerná OAT približne na rovnakej úrovni 38,7 Bq/m³.

Tabuľka 2: Priemerné OAR a OAT na jednotlivých poschodiach v meraných lokalitách.

	OAR [Bq/m ³]			OAT [Bq/m ³]		
	Suterén	Prízemie	Vyš.posch	Suterén	Prízemie	Vyš.posch
Záh.Bystrica	128,7	105,9	90,9	23,3	38,8	38,7
Mochovce	139,7	230,1	106,4	68,9	58,5	44,3

Najsilnejšiu závislosť OAR a OAT sme očakávali od kontaktu monitorovanej miestnosti s podlažím. Vo všetkých lokalitách v priemere 50% monitorovaných miestností bolo v priamom kontakte s podlažím. V Záhorskej Bystrici sme však zaznamenali v priemere len 8% nárast OAR v miestnostiach, ktoré boli v priamom kontakte s podlažím oproti miestnostiam, ktoré neboli v kontakte s podlažím. Bolo to spôsobené tým, že v dôsledku dobrej izolácie nových domov je vplyv podlažia na OAR v domoch zanedbateľný. Značný vplyv podlažia na OAR v miestnostiach sme zistili, ak sme analyzovali domy postavené pred rokom 2000. Zistili sme, že OAR bola približne o 40% vyššia v miestnostiach, ktoré boli v priamom kontakte s podlažím oproti miestnostiam, ktoré neboli v priamom kontakte.

V lokalite Mochoviec sme zistili evidentný vplyv kontaktu miestnosti s podlažím na OAR. Najväčší rozdiel v priemernej OAR sme namerali v Nevidzanoch, kde sme namerali v priemere o 80% vyššie OAR v miestnostiach, ktoré boli v priamom kontakte s podlažím oproti miestnostiam, ktoré neboli v kontakte s podlažím. Slabší vplyv podlažia na OAR sme zistili v Čifároch, kde sme v miestnostiach s kontaktom s podlažím namerali v priemere len o 28% vyššie OAR.

Podobne ako v Záhorskej Bystrici, ani v Ružomberku sme nezaznamenali vplyv podlažia na OAR. Mohlo to však byť spôsobené malou štatistickou vzorkou miestností.

Analyzovali sme aj vplyv kontaktu miestnosti s podlažím na OAT. V lokalitách Mochoviec a Ružomberka sme nevedeli jednoznačne potvrdiť vplyv podlažia na OAT. Pravdepodobný vplyv podlažia sme zistili v Záhorskej Bystrici, kde sme v priemere namerali zhruba o 30% vyššie OAT v miestnostiach s kontaktom s podlažím. Pri analýze vplyvu podlažia len pre domy postavené pred rokom 2000 sme zistili výrazný vplyv podlažia. V miestnostiach, ktoré boli v priamom kontakte s podlažím sme namerali v priemere až o 250% väčšie OAT oproti miestnostiam, ktoré neboli v priamom kontakte.

Študovali sme aj vplyv stavebného materiálu na OAR a OAT. Stavebné materiály sme rozdelili do 3 hlavných skupín: tehla, pórobetón a iné materiály (betón, kameň a iné materiály). V Záhorskej Bystrici a Ružomberku sme však nevedeli jednoznačne potvrdiť vplyv závislosť OAR od konštrukčného materiálu. Zistené rozdiely OAR nemusia jednoznačne súvisieť so stavebným materiálom, ale s ventilačnými podmienkami

a vetracími zvykmi obyvateľov, ako to naznačujú aj sezónne variácie OAR pre jednotlivé domy. Pravdepodobný vplyv konštrukčného materiálu sme zistili v lokalite Mochoviec. Najvyššie priemerné OAR sme namerali v miestnostiach postavených z iných materiálov (298,6 Bq/m³). Najnižšie priemerné OAR boli merané v miestnostiach postavených z pórobetónu (206,1 Bq/m³).

Skúmali sme aj vplyv konštrukčného materiálu na OAT. Pravdepodobný vplyv materiálu na OAT sme namerali v lokalite Mochoviec, kde najvyššie OAT sme merali v miestnostiach postavených z iných materiálov (83 Bq/m³). V miestnostiach postavených z tehál a pórobetónu sme namerali približne rovnaké OAT na úrovni 60 Bq/m³.

3.2. Testovanie modelu pre výpočet objemovej aktivity radónu v pobytových priestoroch v reálnych podmienkach

Najvýznamnejším zdrojom radónu v pobytových priestoroch je geologické podložie, konkrétne ²³⁸U, resp. ²²⁶Ra obsiahnutý v pôde. Obsah uránu v pôde a zemskom podloží sa môže meniť v rozmedzí niekoľkých jednotiek ppm v pieskovočoch a vápencoch až po tisíce ppm v kamenných bridliciach [4]. Táto hodnota môže byť oveľa vyššia na urán bohatých horninách [5]. Objemová aktivita radónu v pôde sa môže meniť od pár tisícok až po milióny Bq/m³ [4]. Koncentrácia radónu v domoch výrazne záleží od permeability zemského podložia a vzduchotesnosti podkladov budovy. Aj najmenšie, niekedy aj neviditeľné trhliny v podklade domu, môžu spôsobiť zvýšenie prísunu radónu do domu a tým výrazné zvýšenie objemovej aktivity.

V minulosti boli uskutočnené pokusy na vytvorenie vierohodných modelov, ktoré by modelovali a predvídali koncentrácie radónu v pobytovom priestore. Jedným z prvých pokusov o predpovedanie sezónnych variácií koncentrácie radónu v pobytovom priestore bol uskutočnený Arvelom [6]. Matematické kalkulácie a modelovania koncentrácie radónu boli vykonané Caprom [7] a Man a Yeungom [8]. Tieto modeli brali do úvah aj vplyv stavebných materiálov na koncentráciu radónu. Ďalšie pokusy o vytvorenie vierohodných modelov popisujúcich koncentrácie radónu môžeme nájsť napríklad v prácach [9-11].

Model, ktorý berie do úvahy pri výpočte OAR vo vnútornom ovzduší rôzne dôležité parametre, ako je koncentrácia radónu v podloží stavby a vonkajšej atmosfére, difúziu cez radónové bariéry, permeabilitu podložia, tlakové diferencie medzi vonkajšou a vnútornou atmosférou, rôzne ventilačné rýchlosti, atď., navrhol Jelle [12].

Na základe tohto modelu, môžeme počítať OAR vo vnútornej atmosfére pomocou vzťahu:

$$C_i = \frac{1}{V \cdot \lambda_v} [E_s \cdot S_i + \Delta p \cdot P_g \cdot C_s \cdot S_s], \quad (1)$$

kde: C_i - objemová aktivita radónu v pobytových priestoroch (Bq/m³),
 C_s - objemová aktivita radónu v podloží (Bq/m³),
 V - objem miestnosti/budovy (m³),
 λ_v - ventilačná rýchlosť (h⁻¹),
 S_i - plocha vnútorných stien obsahujúcich stavebný materiál (m²),
 S_s - plocha podlahy miestnosti/budovy (m²),
 P_g - permeancia podložia (m³/(m²hPa)),

Δp – tlaková diferencia medzi vonkajšou atmosférou a vnútornou atmosférou na úrovni podlahy (Pa),

E_s – exhalačná rýchlosť radónu zo stavebných materiálov ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$).

Exhalačnú rýchlosť E_s v rovnici (1) môžeme vypočítať na základe vzťahu:

$$E_s = \lambda_{Rn} \cdot A_{m,Ra} \cdot \rho \cdot k_e \cdot L \cdot \tanh(d/2L), \quad (2)$$

kde λ_{Rn} – konštanta premeny radónu (s^{-1}),

$A_{m,Ra}$ – hmotnostná aktivita rádia v materiáli (Bq/kg),

ρ – hustota materiálu (kg/m^3),

k_e – emanačný koeficient radónu,

L – difúzna dĺžka radónu (m),

d – hrúbka materiálu (m).

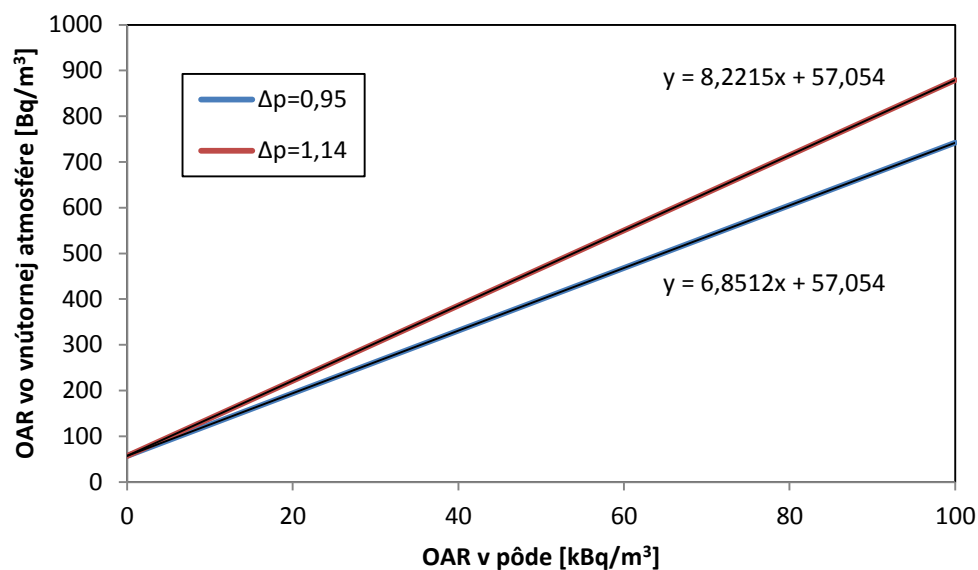
Na základe vzťahu (1) sme počítali objemovú aktivitu radónu v pobytových priestoroch v závislosti od obsahu radónu v podloží. Pri výpočtoch sme zobrali do úvahy rozmery štandardnej miestnosti $5 \times 5 \times 2,5 \text{m}$. Exhalačnú rýchlosť E_s sme určili na základe vzťahu (2). Hodnotu hmotnostnej aktivity ^{226}Ra pre tehlu sme uvažovali rovnú $60 \text{ Bq}/\text{kg}$. Emanačný koeficient radónu pre tehlu sa môže meniť v rozsahu $0,02$ - $0,1$. Preto sme pri našich výpočtoch zobrali strednú hodnotu emanačného koeficienta $0,05$. Stredná hodnota difúznej dĺžky radónu v tehli je $0,3 \text{m}$ [13]. Hrúbku stien sme uvažovali $0,4 \text{m}$. Na základe týchto údajov sme odhadli pre tehlu exhalačnú rýchlosť radónu $E_s = 0,00198 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Objemová aktivita radónu (podľa vzťahu (1)) značne závisí aj od hodnoty Δp , čo je tlaková diferencia medzi vonkajšou atmosférou a vnútornou atmosférou na úrovni podlahy. Hodnotu Δp vieme odhadnúť na základe vzťahu:

$$\Delta p = \frac{M \cdot p_{1atm} \cdot g \cdot h}{R_{gas}} \left[\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right], \quad (3)$$

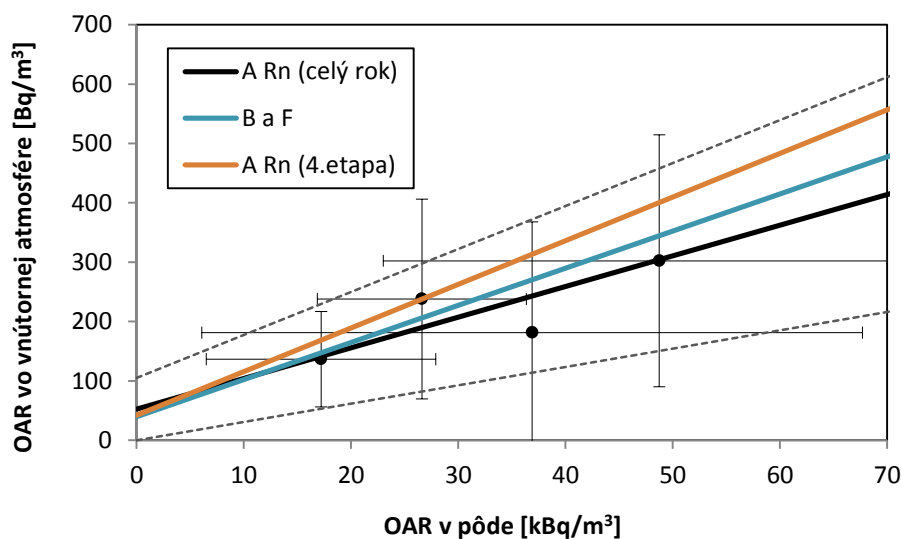
kde M je mólová hmotnosť vzduchu ($28,97 \text{ g}/\text{mol}$), p_{1atm} je tlak vzduchu pri 1 atmosfére (101325 Pa), g je gravitačné zrýchlenie ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$), h je rovnovážna tlaková výška medzi vonkajšou atmosférou a vnútorným ovzduším, R_{gas} je plynová konštanta ($8,31451 \text{ J}/\text{kmol}$), T_e je vonkajšia teplota a T_i je vnútorná teplota v $^\circ\text{K}$. Kvôli konzervatívne prístupu sme naše výpočty uskutočnili pre zimné obdobie ($T_e = 5 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$), kedy sme namerali najvyššie objemové aktivity radónu. Hodnoty rovnovážnej tlakovej výšky sa môžu meniť v rozmedzí $1,5 - 1,8 \text{ m}$, čomu zodpovedá rozsah $\Delta p = (0,95 - 1,14) \text{ Pa}$.

Pre vyššie uvedené parametre sme na základe vzťahu (1) vypočítali závislosť objemovej aktivity radónu v pobytových priestoroch od obsahu radónu v podloží. Výpočty sme urobili pre hodnoty $\Delta p = 0,95$ a $\Delta p = 1,14$ (obrázok 1). Z obrázku vidíme, že vyššia hodnota Δp má za následok zväčšenie smernice priamky.



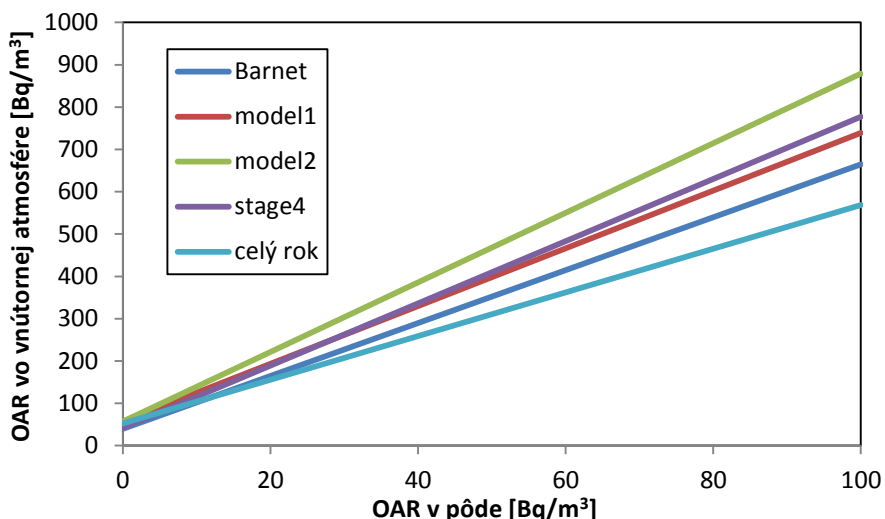
Obrázok 1: Porovnanie závislosti OAR vo vnútornej atmosfére od OAR v pôde pre rôzne hodnoty Δp .

Výsledky, ktoré poskytuje tento model pre OAR, sme porovnali s hodnotami, ktoré sme získali meraniami v rámci projektu V4. Určili sme priemernú ročnú objemovú aktivitu radónu pre jednotlivé merané lokality. V analýzach sme brali do úvah len domy, ktoré boli v priamom kontakte s podložíom. Ďalej na získanie konzervatívneho odhadu sme taktiež určili priemernú kvartálnu objemovú aktivitu radónu v zimnom meracom období. Závislosť priemernej ročnej OAR v domoch od pôdneho radónu (A_{Rn} (celý rok)) a $A_{Rn(4.etapa)}$ môžeme vidieť na obrázku 2. Neistoty zobrazené na obrázku 2 predstavujú jedennásobok štandardnej odchýlky priemeru. Bodkovanou čiarou je vyznačená 1σ pásmo spoľahlivosti fitu údajov. Na obrázku 2 je tiež ukázaná závislosť OAR v domoch od OAR v pôdnom vzduchu publikované Barnetom (B a F) [14]. Závislosť však bola získaná na základe dávkových príkonov gama žiarenia zemskej kôry. Vidíme, že v rámci neistôt, táto krivka dobre súhlasí s našimi výsledkami.



Obrázok 2: Závislosť OAR v domoch od OAR v pôde.

Na obrázku 3 môžeme vidieť porovnanie jednotlivých závislostí s výpočtami získaných na základe vzťahu (1). Vidíme, že náš model (model1: $\Delta p = 0,95$; model2: $\Delta p = 1,14$) dáva najbližšie údaje k hodnotám získaných konzervatívnym prístupom, teda uvažovaním údajov OAR meraných v zimnom období (stage 4). Rovnice jednotlivých fitovacích priamok môžeme nájsť v tabuľke 3.



Obrázok 3: Porovnanie meraných údajov s modelom.

Tabuľka 3: Porovnanie fitovacích priamok.

data	fitovacia priamka
Barnet	$y = 6,25x + 39,70$
stage 4	$y = 7,35x + 42,19$
model1	$y = 6,82x + 57,05$
model2	$y = 8,22x + 57,05$
celý rok	$y = 5,16x + 52,54$

Závislosti ukázané na obrázku 2 majú zásadný význam pre určenie konzervatívnych a priemerných hodnôt efektívnych dávok od radónu obyvateľov žijúcich v rodinných domoch na základe poznatkov o OAR v pôdnom vzduchu. Ich využitím boli vypočítané celkové efektívne dávky obyvateľov od prírodných zdrojov žiarenia v dedinách v okolí JE Mochovce [15].

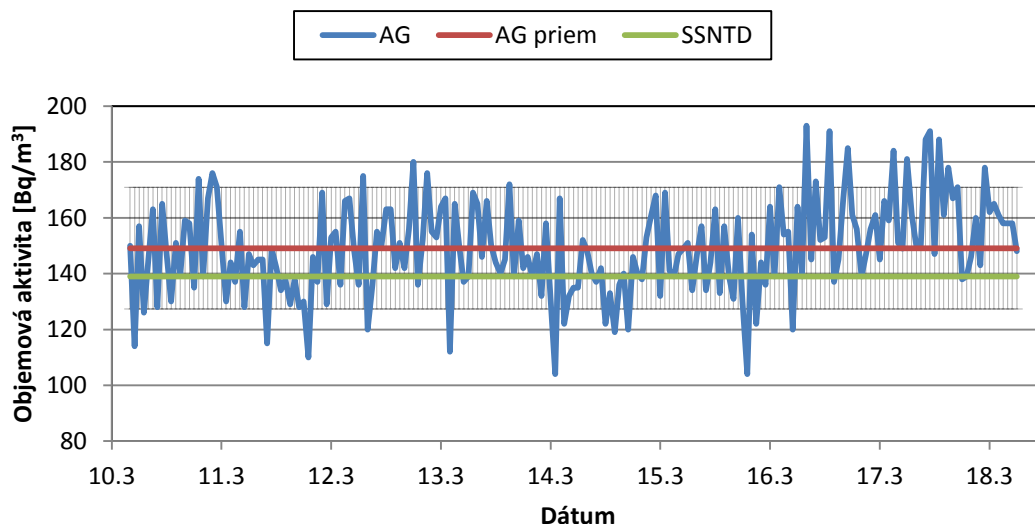
3.3. Radónová diagnostika rodinného domu v lokalite Studienka

V rámci projektu V4 sme realizovali aj komplexnú radónovú diagnostiku rodinného domu v Studienke. Rodinný dom bol vybraný z dôvodu, že lokalita sa nachádza v seizmicky aktívnej oblasti a dom je v priamom kontakte s podlažím. Studienka sa nachádza v lokalite nízkeho pôdneho radónového potenciálu, s priemerným pôdnym radónom na úrovni $(3,5 \pm 1,0)$ kBq/m³ [16].

Cieľom meraní bolo štúdium vplyvu meteorologických podmienok na objemovú aktivitu radónu v pobytovom priestore, jeho variácie ako aj testovanie stopových detektorov v reálnych podmienkach.

V rámci radónovej diagnostiky rodinného domu sme na integrálne merania objemovej aktivity radónu a torónu použili stopové detektory pevnej fázy typu. Stopové detektory boli umiestnené do každej z obytných miestností. Merania sa uskutočnili v trojmesačných meracích intervaloch v priebehu jedného roka v období marec 2012 až február 2013 (1.etapa: marec – máj, 2.etapa: jún – august, 3.etapa: september – november, 4.etapa: december – február). Na kontinuálne meranie objemovej aktivity radónu sme použili radónový monitor AlphaGUARD. Tento monitor pracuje na báze ionizačnej komory s pasívnym aerosólovým filtrom. Údaje o objemovej aktivite radónu sme zaznamenávali v hodinových intervaloch. Pomocou tohto monitora sme zaznamenávali aj údaje o vnútornej teplote, tlaku a vlhkosti. Vonkajšie meteorologické parametre sme získavali z meteorologickej stanice SHMÚ.

Počas prvej meracej etapy (marec – máj), kontinuálny monitor bol umiestnený v miestnosti B. Na obrázku 4 sú zobrazené variácie objemovej aktivity radónu a ich porovnanie s hodnotou nameranou stopovým detektorom. Počas tejto etapy sme pomocou stopového detektora (solid state nuclear track detector - SSNTD) namerali objemovú aktivitu radónu ($139,0 \pm 16,7$) Bq/m³. Vidíme, že priemerná hodnota objemovej aktivity radónu meranej kontinuálnym monitorom ($A = 149,1 \pm 21,8$ Bq/m³) v danej miestnosti je v rámci neistoty 1σ v dobrej zhode s hodnotou získanou stopovým detektorom.

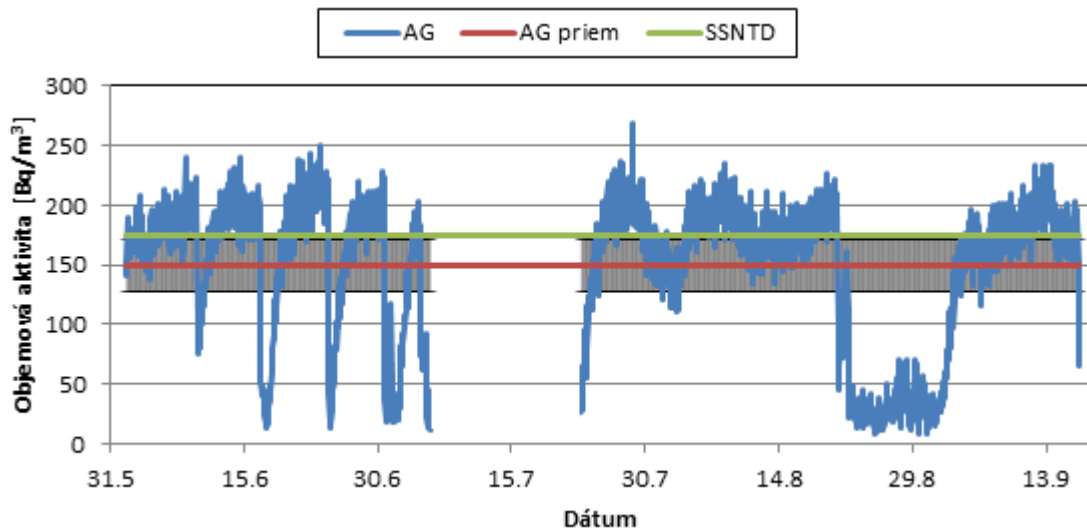


Obrázok 4: Porovnanie objemovej aktivity radónu meranej kontinuálnym monitorom (AG) a stopovým detektorom (SSNTD) v miestnosti B.

V druhom meracom období (jún – august) bol kontinuálny monitor umiestnený v miestnosti A. Priemerná hodnota nameraná kontinuálnym monitorom bola ($150,1 \pm 21,7$) Bq/m³. Táto hodnota je v dobrej zhode s hodnotou nameranou stopovým detektorom ($A = 174 \pm 20,9$ Bq/m³). Záznam z kontinuálneho monitora, ako aj porovnanie so stopovým detektorom, je na obrázku 5.

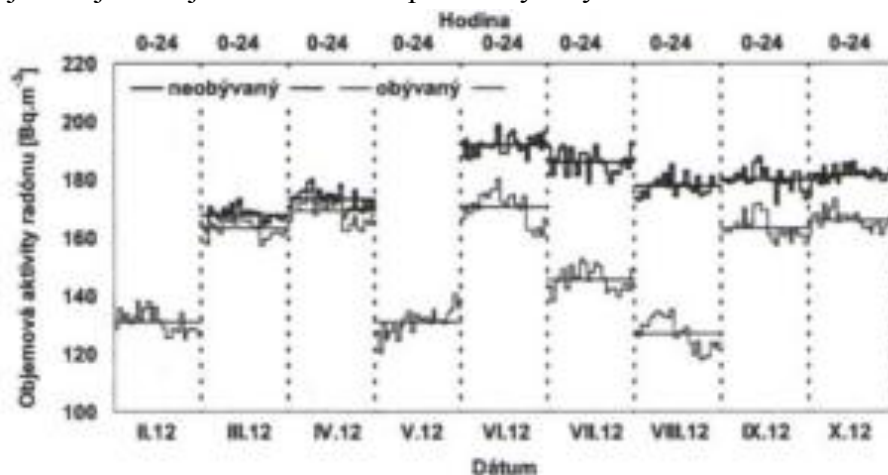
Na priebehu objemovej aktivity radónu (obrázok 5) je vidieť vplyv užívania domu v letnom období. Môžeme vidieť, že objemová aktivita radónu, keď bol dom obývaný a vetraný (obdobie 21.8. – 30.8.), klesla zhruba na 1/4 voči stavu, keď dom bol neobývaný a nevetraný. Na zázname môžeme taktiež vidieť v období od 31.5. do 5.7. výrazné poklesy

objemovej aktivity, ktoré boli spôsobené intenzívnym vetraním domu. Tieto vetrania slúžili na štúdium prísunu radónu do miestnosti a ventilačných podmienok.



Obrázok 5: Porovnanie objemovej aktivity radónu meranej kontinuálnym monitorom (AG) a stopovým detektorom (SSNTD) v miestnosti A.

Počas dlhodobjšieho pobytu v rodinnom dome v auguste, kedy sa dom najviac využíval, boli okrem nízkych aktivít pozorované aj pravidelné variácie radónu spôsobené vplyvom zmien meteorologických podmienok. Ďalej sme podrobnejšie študovali objemovú aktivitu radónu v miestnosti A počas období, keď bol dom obývaný aj neobývaný. Zistili sme zreteľné rozdiely pri denných aj sezónnych variáciách. Pri označení „neobývaný“ dom sme z analýz vypustili údaje, keď bol dom kvôli krátkodobým vetraniam užívaný. Pre mesiace február a máj, z dôvodu krátkeho kontinuálneho monitorovania tohto stavu domu, nie sú údaje o objemovej aktivite radónu pre neobývaný dom zobrazené.



Obrázok 6: Priemerné denné a sezónne variácie objemovej aktivity radónu v obývanom a neobývanom dome merané v miestnosti A.

Najväčšie rozdiely medzi objemovými aktivitami radónu pre obývaný a neobývaný dom sme zaznamenali v letnom období, keď bol dom intenzívne vetraný. Najnižšie

rozdiely sme pozorovali počas jarých a jesenných mesiacov, kedy rozdiel bol len do 20% v porovnaní s objemovou aktivitou radónu pre neobývaný dom.

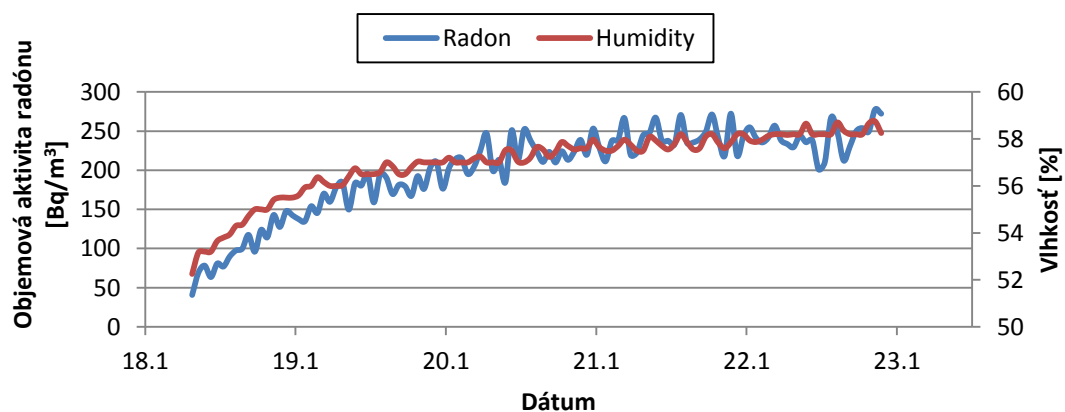
Miestnosť A bola pravidelne vetraná s cieľom analyzovania nárastových kriviek na odhadnutie ventilačných rýchlostí a prísunu radónu do miestnosti pre rôzne obdobia roku. Jednotlivé nárasty sme fitovali podľa vzťahu $OAR(t) = a + \frac{c}{b}(1 - e^{-bt})$, kde hodnota „a“ predstavuje počiatočnú aktivitu radónu v miestnosti, „b“ charakterizuje sumu ventilačnej rýchlosti miestnosti a konštantu premeny ^{222}Rn a „c“ je rýchlosť prísunu radónu do miestnosti.

Za celé meracie obdobie sme priemernú rýchlosť prísunu radónu do miestnosti určili na $(5,9 \pm 0,5) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$. Jedine za mesiac apríl sme namerali zvýšenú rýchlosť prísunu radónu do miestnosti, $(11,4 \pm 1,4) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$. To by mohlo vysvetľovať nameranie najvyšších hodnôt objemovej aktivity radónu v jarnej meracej etape pomocou stopových detektorov. Ventilačná rýchlosť sa ukázala byť relatívne nízka, v priemere za celé obdobie $(0,030 \pm 0,003) \text{ h}^{-1}$. Zvýšenú ventilačnú rýchlosť sme taktiež namerali v mesiaci apríl $(0,048 \pm 0,006) \text{ h}^{-1}$.

V priebehu roku 2014 bol dom kompletne zrekonštruovaný. Vonkajšie steny domu boli zateplené. V miestnosti A bola položená nová podlaha s izoláciou proti vlhkosti. Tiež bola znížená výška stropu použitím sadrokartónových dosiek o 0,23 m. Študovali sme ako sa tieto úpravy prejavili na zmene koncentrácií radónu v miestnosti A.

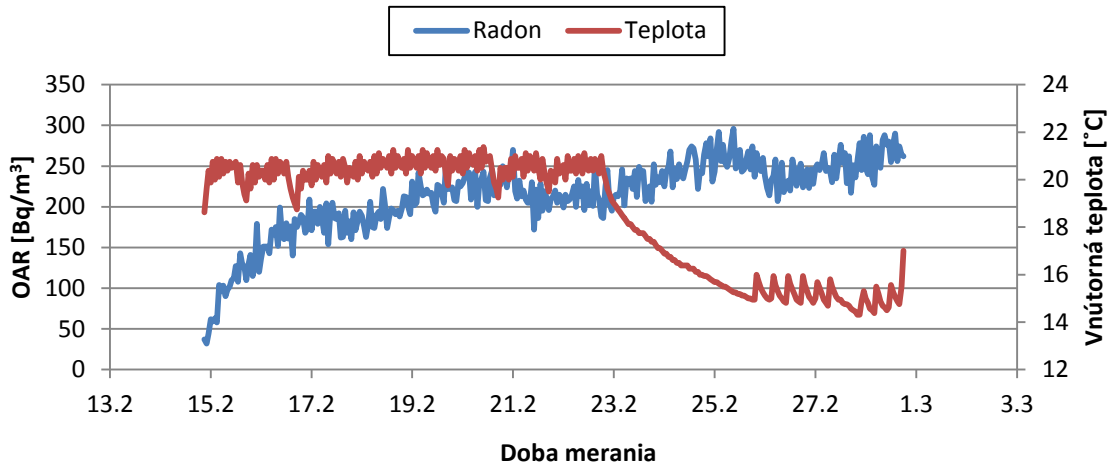
Zistili sme až 56% nárast objemovej aktivity radónu v miestnosti po rekonštrukcii ($A=211,8 \pm 27,0 \text{ Bq/m}^3$) oproti hodnote pred rekonštrukciou ($A=136,0 \pm 16,3 \text{ Bq/m}^3$). Porovnali sme nárastové krivky OAR v období po rekonštrukcii domu, s nárastovými krivkami OAR meranými pred jeho rekonštrukciou. Snažili sme sa zistiť, či došlo k nejakej zmene vo ventilačnej rýchlosti alebo rýchlosti prísunu radónu. Zistili sme, že priemerná hodnota rýchlosti prísunu radónu do miestnosti bola $(7,3 \pm 0,7) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$. Táto hodnota je o 25% ako hodnota zistená pred rekonštrukciou t.j. $(5,9 \pm 0,5) \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$. Taktiež sme porovnali ventilačné rýchlosti pred a po rekonštrukcii a dostali sme prakticky rovnaké hodnoty $(0,030 \pm 0,003) \text{ h}^{-1}$ pred, resp. $(0,032 \pm 0,003) \text{ h}^{-1}$ po rekonštrukcii.

Hľadali sme súvis medzi radónom a meteorologickými parametrami. Priemerná hodnota korelačného koeficientu medzi radónom a vlhkosťou bola na úrovni 0,78. Na základe týchto meraní a meraní spred rekonštrukcie môžeme vyhlásiť, že z dlhodobého hľadiska radón vykazuje koreláciu s vlhkosťou.

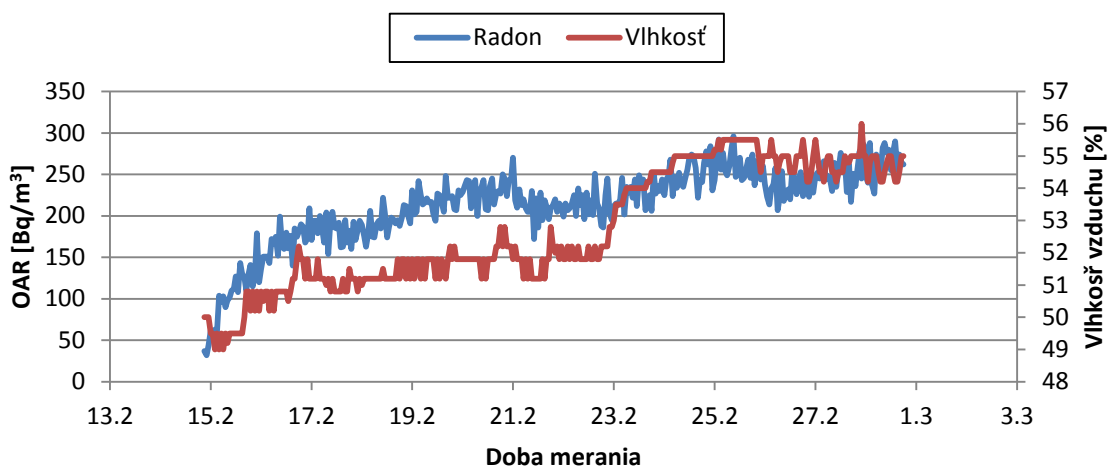


Obrázok 7 : Porovnanie nárastu OAR s nárastom vlhkosti v miestnosti.

V ďalšom sme dlhodobejšie študovali správanie sa OAR v miestnosti pri zmene vnútornej teploty ovzdušia miestnosti. Počiatočná teplota v miestnosti bola približne 21 °C. Miestnosť bola najprv 30 minút intenzívne vetraná, čo spôsobilo pokles OAR až na úroveň 30 Bq/m³, pokles teploty na 18,6 °C a pokles vlhkosti vnútorného ovzdušia na 49% (obrázok 8 a 9).



Obrázok 8: Porovnanie OAR s vnútornou teplotou miestnosti.

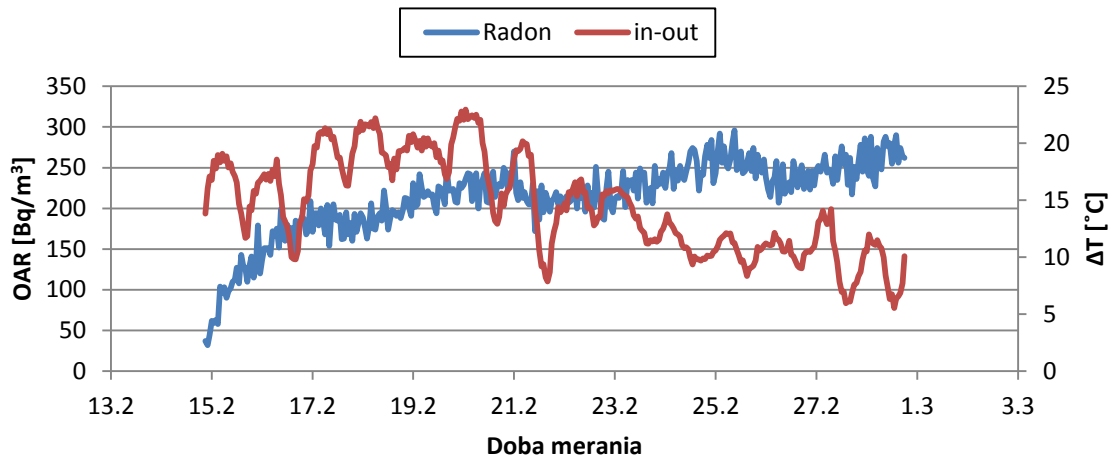


Obrázok 9: Porovnanie OAR s vlhkosťou vnútorného ovzdušia.

Po uzavretí miestnosti sa teplota v priebehu 3 hodín vrátila na pôvodnú teplotu 21°C. OAR a vlhkosť postupne rástli až na hodnotu 230 Bq/m³, resp. 52% (obrázok 9). Dňa 22.2.2015 o 18:30 hodine bolo preprogramované vykurovanie na 14 °C. To spôsobilo, že teplota ovzdušia postupne klesala až do 15. hodiny 25.2.2015, vlhkosť sa zvyšovala až do 55% a simultánne s vlhkosťou rástla aj OAR až na 270 Bq/m³.

Evidentným výsledkom tohto experimentu bolo, že pokles teploty ovzdušia v miestnosti spôsobilo vzrast OAR, čo bolo vzhľadom na obdobie merania prekvapujúce. Preto sme v ďalšom analyzovali aj správanie sa tepelného rozdielu medzi vnútornou teplotou T_i a vonkajšou teplotou T_o , ktorý je úmerný rozdielu tlaku Δp medzi vonkajšou a vnútrajšou na úrovni terénu [12]. Hodnota Δp je kladná ak $T_i > T_o$ a vtedy sú vytvorené podmienky pre nasávanie vzduchu z podlažia do vnútorných priestorov budovy.

Na obrázku 10 sú porovnané priebehy OAR a $\Delta T = T_i - T_o$. Z obrázku vidieť, že po znížení teploty v miestnosti po 22.2.2015 došlo k zníženiu ΔT . OAR však vzrástla napriek tomu, že sa znížil podtlak v miestnosti a teda zrejme aj veľkosť prísunu radónu z podlažia. To naznačuje, že hlavným zdrojom radónu v miestnosti je jeho exhalácia zo stien a nie pôdny radón.

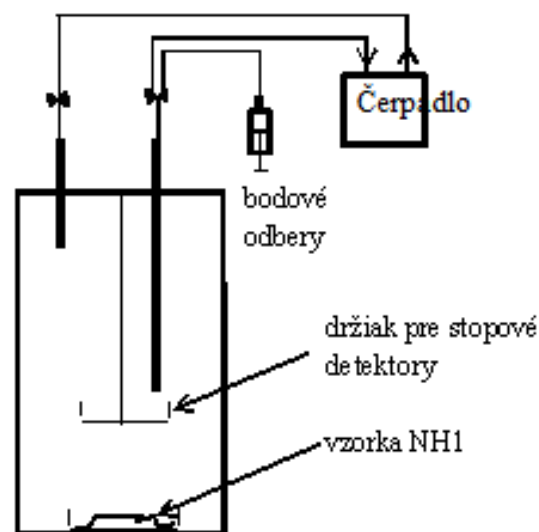


Obrázok 10: Porovnanie priebehov OAR a teplotných rozdielov v miestnosti.

3.4. Radónová komora na testovanie stopových detektorov

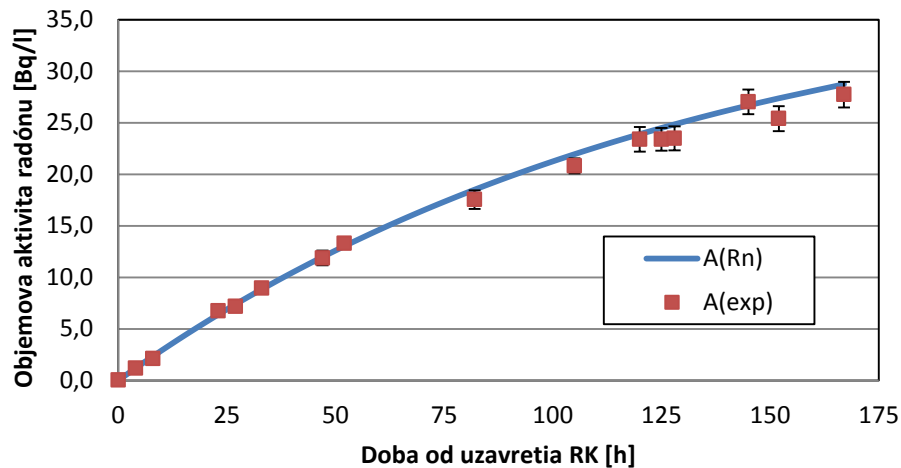
Súbežne s meraniami objemovej aktivity radónu a torónu v bytových priestoroch v rámci projektu V4 sme skonštruovali radónovú komoru na testovanie stopových detektorov v laboratórnych podmienkach.

Radónová komora (RK) bola postavená na báze plastového suda o objeme 150ℓ. Ako zdroj radónu bola použitá uránová hornina (NH1) z Novomestskej Huty. Zapojenie radónovej komory je zobrazené na obrázku 11. V prvej etape bola testovaná tesnosť akumuláčnej nádoby a časová závislosť zmeny objemovej aktivity ^{222}Rn (OAR) v akumuláčnej nádobe.



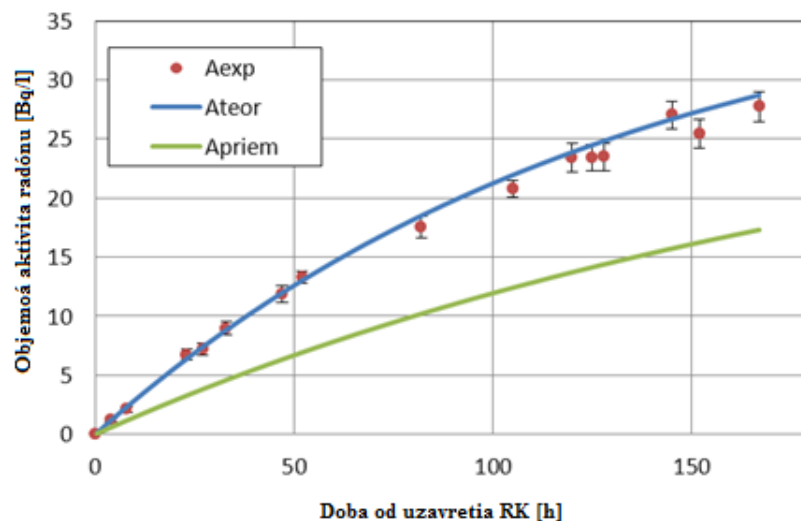
Obrázok 11: Schéma zapojenia radónovej komory.

Po zistení tesnosti RK sme pristúpili k testovaniu stopových detektorov na meranie objemových aktivít radónu a torónu. Po uzavretí detektorov do RK sa vypočítala teoretická hodnota expozície detektorov, pričom sa vychádzala z časovej zmeny priemernej objemovej aktivity radónu v RK.



Obrázok 12: Porovnanie objemovej aktivity radónu v RK ($A(\text{exp})$) s teoretickou hodnotou objemovej aktivity ($A(\text{Rn})$).

Na overenie správnosti určenia expozície sme uskutočňovali bodové odbery na meranie objemovej aktivity radónu. Pred každým odberom bolo premiešavanie vzduchu v RK počas doby 20 minút s prietokom 1 l/min. Z hodnôt bodových odberov na obrázku 12 vidíme, že sa namerané hodnoty objemovej aktivity radónu, v rámci neistoty 1σ , zhodujú s teoretickou hodnotou objemovej aktivity radónu.



Obrázok 13 : Porovnanie nárastu objemovej aktivity radónu v RK so zmenou jeho priemernej objemovej aktivity v RK.

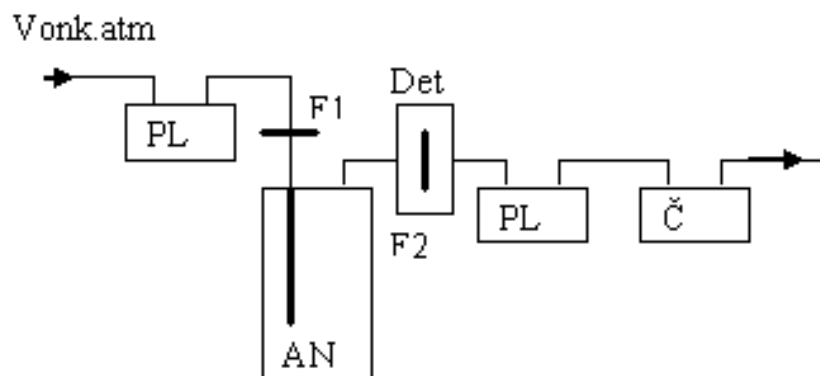
Na obrázku 13 vidíme porovnanie zmeny priemernej hodnoty objemovej aktivity radónu v RK s nárastom jeho objemovej aktivity v RK. Vidíme, že na konci nášho testovania bola hodnota priemernej objemovej aktivity radónu na úrovni 17,30 Bq/l.

Hodnota nameraná stopovým detektorom bola však 27,98 Bq/l. Z porovnania vidíme výrazný rozdiel v oboch hodnotách. Hodnota nameraná stopovým detektorom sa v rámci neistoty zhoduje s hodnotou objemovej aktivity radónu na konci merania $A=(27,73\pm 1,25)$ Bq/l. Zistený rozdiel medzi hodnotou priemernej aktivity radónu v komore a hodnotou získanou stopovým detektorom mohol byť pravdepodobne spôsobený tým, že testované detektory nie sú vhodné na použitie v situáciách, kedy sa OAR rýchlo mení v krátkom časovom intervale. Pri ďalšom testovaní stopových v RK, keď bola objemová aktivita radónu v RK konštantná, bol zistený dobrý súlad medzi OAR určenou z meraní pomocou stopových detektorov a OAR nameranou v RK pomocou scintilačných komôrok [17].

3.5. Dvojfiltrový detekčný systém pre monitorovanie objemovej aktivity radónu

Na nepretržité získavanie údajov o koncentrácii radónu v rôznych prostrediach s využitím na sledovanie ich dynamiky a štúdium príčin ich zmien, ako aj na využitie radónu ako stopovača environmentálnych procesov, je predpokladom kontinuálne monitorovanie radónu.

Schéma detekčného systému pre meranie OAR dvojfiltrovou metódou je zobrazená na obrázku 14. Na vstupe detekčného systému sa nachádza filter s priemerom 80 mm, ktorého úlohou je zachytávanie aerosólov obsiahnutých v presávanom vzduchu. Za vstupným filtrom sa nachádza akumuláčna nádoba s objemom 200 l, v ktorom sa hromadia nové produkty premeny z radónu v presávanom vzduchu. Vzduch z akumuláčnej nádoby je presávaný cez druhý filter s priemerom 25 mm, na ktorom sa zachytávajú produkty premeny nahromadené z radónu v akumuláčnej nádobe. Približne 4,5 mm nad druhým filtrom je umiestnený kremíkový detektor s povrchovou bariérou, s citlivou plochou 450 mm², pre detekciu alfa častíc emitovaných produktmi premeny radónu zachytených na druhom filtri. Vzduch je cez detekčný systém presávaný kontinuálne rýchlosťou na úrovni 15 l/min.



Obrázok 14 : Schéma dvojfiltrového detekčného systému pre meranie radónu. (F1 - vstupný filter, AN - akumuláčna nádoba, Det - detekčná hlavica, F2 - druhý filter, PL - plynomery, Č - čerpadlo).

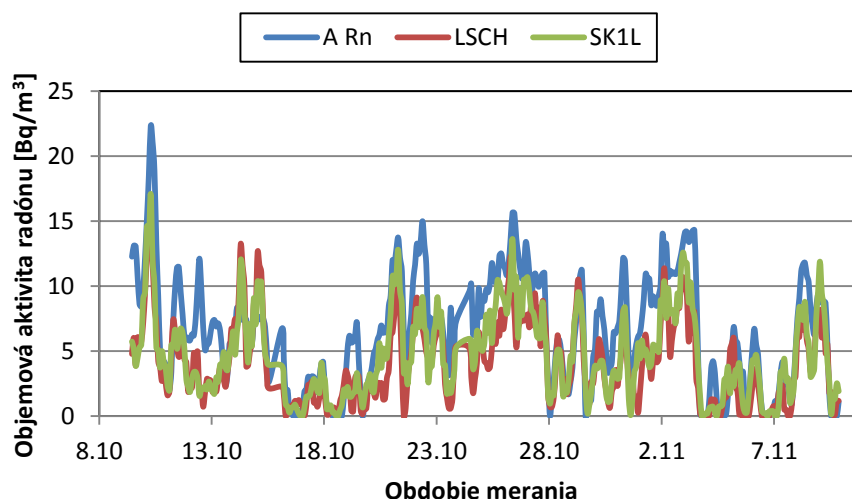
V období od 9.10. do 9.11.2013 sme uskutočnili testovacie merania detekčného systému meraním OAR vonkajšej atmosféry. Vzduch z vonkajšej atmosféry sme cez detekčný systém presávali konštantným prietokom na úrovni 18 l/min. Kvôli zanášaniam

filtra na vstupe do detekčného systému sme museli filter v pravidelných týždňových intervaloch vymieňať.

Pomocou kalibračných koeficientov, určených na základe Ward-Borakovej metódy, sme na základe nameraných početností za 2 hodiny určili hodnotu OAR vo vonkajšej atmosfére [18]. Tieto hodnoty (A Rn) sme porovnávali s OAR, ktoré sme merali súbežne z rovnakého odberového miesta pomocou litrovej (SK1L) a veľkoobjemovej scintilačnej komory(LSCH).

Z porovnania hodnôt OAR na obrázku 15 vidíme, že priebeh OAR meraný dvojfiltrovým detekčným systémom je v dobrej zhode s priebehmi získanými pomocou litrovej a veľkoobjemovej scintilačnej komory. Na získanom priebehu OAR môžeme vidieť zaregistrované denné variácie OAR, čo svedčí o dostatočnej reakčnej schopnosti detekčného systému na vonkajšie zmeny atmosféry.

Určili sme hodnoty korelačných koeficientov medzi nameranými OAR jednotlivými detektormi. Zistili sme vysoký stupeň korelácie medzi odozvami jednotlivých detekčných systémov ($k= 0,87$ medzi dvojfiltrovým detekčným systémom a litrovou scintilačnou komorou; $k= 0,84$ medzi dvojfiltrovým detekčným systémom a veľkoobjemovou scintilačnou komorou). Na základe získaných korelačných koeficientov môžeme usúdiť, že detekčný systém založený na dvojfiltrovej metóde má dostatočnú reakčnú rýchlosť a možno ju použiť na meranie OAR vo vonkajšej atmosfére.



Obrázok 15: Porovnanie OAR meranou dvojfiltrovým detekčným systémom (A Rn) s litrovou scintilačnou (SK1L) a veľkoobjemovou komorou (LSCH).

Záver

Ciele dizertačnej práce boli stanovené v súlade s potrebami riešenia úloh radónovej problematiky na Katedre jadrovej fyziky a biofyziky FMFI UK v Bratislave. Vyhodnotili sme výsledky meraní radónového prieskumu v pobytových priestoroch v troch rôznych lokalitách Slovenska. Monitorovanie OAR a OAT sme uskutočnili spolu v 70 domoch v 4 trojmesačných meracích etapách počas 1 roka. Hlavným spoločným znakom v týchto lokalitách bolo, že OAR vykazovala variácie s minimom v letnom a maximom v zimnom období. V niektorých monitorovaných domoch boli variácie OAR výraznejšie, v niektorých menej výrazné v závislosti od užívacích spôsobov obyvateľov. Priemerná

hodnota OAR v lokalite Záhorskej Bystrice bola na úrovni 105 Bq/m^3 napriek tomu, že Záhorská Bystrica leží v oblasti vysokého pôdneho radónového potenciálu. V tejto lokalite bolo medzi monitorovanými domami vysoké percento domov postavených po roku 2000, čo mohlo spôsobiť nameranie takejto nízkej priemernej OAR.

V lokalite Mochoviec sme monitorovali OAR a OAT v dvoch dedinách. Tieto dediny sa nachádzajú v oblasti stredného pôdneho radónového potenciálu. V tejto oblasti, pravdepodobne kvôli prevahe starých domov, sme namerali priemerné OAR na úrovni $193,4 \text{ Bq/m}^3$ resp. $240,3 \text{ Bq/m}^3$.

Poslednou monitorovanou oblasťou bola lokalita Ružomberok. Nachádza sa v oblasti stredného a nízkeho pôdneho radónového potenciálu. Priemerná ročná OAR bola na úrovni 162 Bq/m^3 .

Vo všetkých monitorovaných oblastiach, okrem Ružomberka, sme našli dom, v ktorom priemerná ročná OAR presahovala úroveň 400 Bq/m^3 .

Použité stopové detektory boli schopné aj merať objemovú aktivitu torónu. Týmto spôsobom sme získali unikátne výsledky o OAT. Zistili sme, že priemerné OAT v jednotlivých lokalitách sa pohybovali v rozmedzí $37,5 \text{ Bq/m}^3$ až $60,7 \text{ Bq/m}^3$. Určili sme pomery OAR/OAT, ktorých hodnoty sa pohybovali okolo 3, až na výnimku dediny Čifáre, kde bol tento pomer na úrovni 4,6.

Študovali sme vplyv podlažia na OAR a OAT. V lokalite Záhorskej Bystrice sme zistili zvýšenú OAR v domoch, ktoré majú kontakt s podlažím, len v domoch postavených pred rokom 2000. Zistili sme, že v miestnostiach, ktoré boli v priamom kontakte s podlažím, bola približne o 40% vyššia OAR v porovnaní s miestnosťami, ktoré neboli v kontakte s podlažím. Najviac evidentný vplyv podlažia na OAR sme zaznamenali v lokalite Mochoviec, kde v miestnostiach, ktoré boli v priamom kontakte s podlažím, sme namerali v priemere o 54% vyššie OAR, ako v miestnostiach, ktoré neboli v priamom kontakte s podlažím. V Ružomberku sme nezaznamenali evidentný vplyv podlažia na OAR.

Analyzovali sme aj vplyv podlažia na OAT. V lokalitách Ružomberka a Mochoviec sme nevedeli jednoznačne potvrdiť vplyv podlažia na OAT. Pravdepodobný vplyv podlažia na OAT sme namerali v Záhorskej Bystrici.

Pri štúdiu OAR a OAT v závislosti od konštrukčných materiálov, sme v Záhorskej Bystrici a Ružomberku nevedeli jednoznačne potvrdiť ich vplyv na objemovú aktivitu. Zistené rozdiely OAR nemuseli súvisieť s použitým stavebným materiálom, ale s ventilačnými podmienkami a vetracími zvykmi obyvateľov, ako to naznačovali sezónne variácie OAR pre jednotlivé domy. Pravdepodobný vplyv stavebného materiálu na OAR sme zaznamenali v oblasti Mochoviec, kde sme najvyššie OAR namerali v miestnostiach postavených z materiálov označených majiteľmi ako iné ($298,6 \text{ Bq/m}^3$).

Pravdepodobný vplyv materiálu na OAT sme zaznamenali taktiež jedine v oblasti Mochoviec.

Výsledky získané meraniami v bytových priestoroch sme porovnali s hodnotami, ktoré sme vypočítali na základe teoretického modelu správania sa radónu v bytových priestoroch. Zistili sme, že model dobre popisuje OAR v domoch v zimnom období v závislosti od OAR v pôdnom vzduchu. Tento poznatok má zásadný význam pre konzervatívny odhad priemerných efektívnych dávok od radónu obyvateľov žijúcich v

rodinných domoch na základe poznatkov o OAR v pôdnom vzduchu. To môže byť využité pri výpočtoch celkovej efektívnej dávky obyvateľov od prírodných zdrojov žiarenia.

V rámci riešenia dizertačnej práce sme realizovali aj komplexnú radónovú diagnostiku rodinného domu v Studienke. Cieľom meraní bolo štúdium vplyvu meteorologických podmienok na objemovú aktivitu radónu v pobytovom priestore, jeho variácie ako aj testovanie stopových detektorov v reálnych podmienkach. Študovali sme objemovú aktivitu radónu počas období, keď bol dom obývaný aj neobývaný. Zistili sme zreteľné rozdiely pri denných aj sezónnych variáciách. Najväčšie rozdiely medzi objemovými aktivitami radónu pre obývaný a neobývaný dom sme zaznamenali v letnom období, keď bol dom intenzívne vetraný. Najnižšie rozdiely sme pozorovali počas jarných a jesenných mesiacov, kedy rozdiel medzi OAR pre obývaný a neobývaný dom bol len do 20%. Pre obývaný a vetraný dom sme pozorovali denné vlny OAR s minimom v popoludňajších hodinách a maximom v skorých ranných hodinách. Na základe analýz nárastov OAR po vyvetraní miestnosti sme študovali prísun radónu do miestnosti. Analýzy boli uskutočňované v dome pred aj po rekonštrukcii domu. Zistili sme, že po rekonštrukcii došlo k zmene rýchlosti prísunu radónu do miestnosti ($7,3 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ po rekonštrukcii a $5,9 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ pred rekonštrukciou). Zvýšená hodnota OAR po rekonštrukcii ($211,8 \text{ Bq}/\text{m}^3$) oproti hodnote pred rekonštrukciou ($136 \text{ Bq}/\text{m}^3$) môže byť teda pravdepodobne vysvetlená práve zvýšením rýchlosti prísunu radónu do miestnosti. Na základe tohto faktu a prakticky nezmenenej hodnoty ventilačnej rýchlosti ($0,03 \text{ h}^{-1}$) sme usúdili, že hlavným zdrojom radónu v miestnostiach domu sú steny miestnosti.

Na Katedre jadrovej fyziky a biofyziky sme súbežne s meraniami OAR v rodinných domoch uskutočnili testovanie použitých stopových detektorov v laboratórnych podmienkach. Na testovanie stopových detektorov sme zostavili radónovú komoru. Porovnali sme hodnotu meraní stopovým detektorom s priemernou hodnotou OAR v radónovej komore. Zaznamenali sme až 60% rozdiel medzi meranými hodnotami. Na základe zisteného rozdielu sme usúdili, že testované detektory nie sú vhodné na použitie v situáciách, kedy sa OAR rýchlo mení v krátkom časovom intervale. Pri ďalšom testovaní stopových detektorov v RK, keď bola objemová aktivita radónu v RK konštantná, bol zistený dobrý súlad medzi OAR určenou z meraní pomocou stopových detektorov a OAR nameranou v radónovej komore pomocou scintilačných komôrok.

V poslednej časti našej práce sme sa zaoberali testovaním dvojfiltrového detekčného systému na meranie OAR. Výsledky získané týmto detekčným systémom sme porovnali s monitormi operujúcimi na našej katedre. Na základe meraných výsledkov a vysokého stupňa korelačných koeficientov medzi jednotlivými detektormi (0,87 resp. 0,84) môžeme konštatovať, že detekčný systém založený na dvojfiltrovej metóde je vhodný na meranie OAR vo vonkajšej atmosfére aj na úrovni $1 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Council directive 2013/59/EURATOM. Dostupnosť na internete: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2014:013:0001:0073:EN:PDF>
- [2] DARBY, S. et al. 2005. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. In *British Medical Journal*. 2005, vol. 330.
- [3] LETKOVIČOVÁ, M. a kol. 2002. Zdravotný stav obyvateľstva v okolí atómových elektrární Mochovce po 4 rokoch prevádzky. In: Zborník prednášok 4. Banskoštiavnické dni 2002. Žiar nad Hronom: ISK Senec, 2002, p. 132.
- [4] NORDIC, 2000. Naturally occurring radioactivity in the Nordic countries – recommendations. The radiation protection authorities of Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden. Stockholm, 2000.
- [5] UNSCEAR, 2000. *Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*. New York: United Nations Press, 2000.
- [6] ARVELA, H. 1995. Seasonal variation in radon concentration of 3000 dwellings with model comparisons. In *Radiation Protection Dosimetry*. 1995, vol. 59, p. 33-42.
- [7] CAPRA, D. et al. 1994. Influence of ventilation rate on indoor radon concentration in a test chamber. In *Radiation Protection Dosimetry*. 1994, vol. 56, p. 15-18.
- [8] MAN, C. K. a YEUNG, H. S. 1999. Modelling and measuring the indoor radon concentrations in highrise buildings in Hong Kong. In *Applied Radiation and Isotopes*. 1999, vol. 50, p. 1131-1135.
- [9] FONT, L. et al. 1999. Experimental and theoretical study of radon levels and entry mechanisms in a Mediterranean climate house. In *Radiation Measurements*. 1999, vol. 31, p. 277-282.
- [10] WANG, F. a WARD, I. C. 2000. The development of a radon entry model for a house with a cellar. In *Building and Environment*. 2000, vol. 35, p. 615-631.
- [11] WITH, G. de a Jong, P. de 2011. Simulation of thoron and thoron progeny concentrations in the indoor environment. In *Journal of Building Physics*. 2011, vol 35, p. 101-127.
- [12] JELLE, B. J., 2012. Development of a model for radon concentration in indoor air. In *Science of the Total Environment*. 2012, vol. 416, p. 343-350.
- [13] OTHMAN, I. 1994. Radionuclide content in some materials in Syria and their indoor gamma dose rate. In *Radiation Protection Dosimetry*. 1994, vol. 55, No. 4, p. 299-304.

[14] BARNET, I. a FOJTÍKOVÁ, I. 2008. Soil gas radon, indoor radon and gamma dose rate in CZ: Contribution to geostatistical methods for European atlas of natural radiations. In *Radiation Protection Dosimetry*. 2008, vol. 130, no. 1, pp. 81 – 84.

[15] POHRONSKÁ, Ž. 2014. *Radiačná záťaž obyvateľstva od prírodných rádionuklidov v okolí Mochoviec*. [diplomová práca]. Bratislava: FMFI UK, 2014. 83s.

[16] Mapový server Štátneho Geologického Ústavu Dionýza Štúra [online databáza]. Dostupné na internete: <http://mserver.geology.sk:8085/geofyzika4/mpviewer.jsf?width=1048&height=577>.

[17] BLAHUŠIAK, P. Katedra jadrovej fyziky a biofyziky, Univerzita Komenského, Mlynská dolina, Bratislava. Osobná komunikácia.

[18] WARD, D.C a BORAK, T.B. 1991. Determination of time-varying ^{222}Rn concentrations using flow-through scintillation flasks. In: *Health Physics*. 1991, vol. 61, no. 6, p. 799-807.

Publikačná činnosť

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 Müllerová, Monika 30% - Kozak, Krzsysztof 3% - Kovács, Tibor 3% - Csordás, Anita 3% - Grzadziel, Dominik 3% - Holý, Karol 30% - Mazur, Jadwiga 3% - Moravcsík, Attila 16% - Neznal, Martin 3% - Neznal, Matej 3% - Smetanová, Iveta 3%: Preliminary results of indoor radon survey in V4 countries
Lit. 4 záz.

In: *Radiation Protection Dosimetry*. - Vol. 160, No. 1-3 (2014), s. 210-213

[RADON 2013 : Protection Against Radon at Home and at Work : Conference. 7th, Prague, 2.-6.9.2013]

POZNÁMKA: Vyšlo aj ako abstrakt - 7th Conference on Protection Against Radon at Home and at Work. - Prague : Czech Technical University, 2013. - S. 91. - ISBN 978-80-01-05324-9

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

ADE01 Holý, Karol 30% - Moravcsík, Attila 25% - Müllerová, Monika 15% - Bujnová, Alena 15% - Bulko, Martin 15%: Dvojfiltrový detekčný systém pre kontinuálne monitorovanie radónu

Lit. 4 záz., 5 obr.

In: *Bezpečnosť jaderné energie = Bezpečnosť jadrovej energie*. - Roč. 20 (58), č. 7/8 (2012), s. 212-215

ADE02 Müllerová, Monika 35% - Moravcsík, Attila 13% - Holý, Karol 35% - Hutka, Miroslav 12% - Holá, Oľga 5%: Mapovanie distribúcie koncentrácie radónu v prízemnom rodinnom dome

Lit. 6 záz.

In: *Bezpečnosť jaderné energie = Bezpečnosť jadrovej energie*. - Roč. 21, č. 11/12 (2013), s. 355-357

ADE03 Holý, Karol 34% - Moravcsík, Attila 33% - Müllerová, Monika 33%: Štúdium ročných variácií radónu a torónu v pobytových priestoroch s vysokým pôdnym radónovým rizikom

Lit. 10 záz., 1 obr., 7 tab.

In: Bezpečnosť jaderné energie. - Roč. 23, č. 1/2 (2015), s. 18-21

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 Moravcsík, Attila 100%: Kontinuálne meranie objemovej aktivity radónu dvojfiltrou metódou

Recenzované

Lit. 6 záz., 8 obr.

In: Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava 2011 : Zborník príspevkov. - Bratislava : Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, 2011. - S. 237-243. - ISBN 978-80-89186-87-7

[Študentská vedecká konferencia FMFI UK 2011. Bratislava, 19.4.2011]

AFG Abstrakty príspevkov zo zahraničných vedeckých konferencií

AFG01 Csordás, Anita 8% - Neznal, Matej 3% - Neznal, Martin 3% - Holý, Karol 20% - Müllerová, Monika 20% - Moravcsík, Attila 10% - Mazur, Jadwiga 8% - Kozak, Krzysztof 8% - Grzadziel, Dominik 8% - Kovács, Tibor 8% - Nikodémová, Denisa 2% - Cabáneková, Helena 2%: Indoor radon and thoron survey in V4 countries

In: 34. Dny radiačnej ochrany. Sborník abstraktů. - Praha : ČVUT, 2012. - S. 136. - ISBN 978-80-01-05140-5

[Dny radiačnej ochrany 2012. Konferencie. 34., Třeboň, 5.-9.11.2012]

AFG02 Müllerová, Monika 35% - Moravcsík, Attila 13% - Holý, Karol 35% - Hutka, Miroslav 12% - Holá, Olga 5%: Mapovanie distribúcie koncentrácie radónu v prízemnom rodinnom dome

In: 35. Dny radiačnej ochrany : sborník abstraktů. - Praha : ČVUT, 2013. - S. 138. - ISBN 978-80-01-05356-0

[Dny radiačnej ochrany 2013 : konferencie. 35., Třeboň, 11.-15.11.2013]

AFH Abstrakty príspevkov z domácich vedeckých konferencií

AFH01 Holý, Karol 30% - Moravcsík, Attila 25% - Müllerová, Monika 15% - Bujnová, Alena 15% - Bulko, Martin 15%: Dvojfiltrou detekčný systém pre kontinuálne monitorovanie radónu [elektronický dokument]

Popis urobený 19.12.2011

In: 33. dni radiačnej ochrany : Zborník abstraktov. - Bratislava : Fakulta verejného zdravotníctva Slovenskej zdravotnej univerzity, 2011. - S. 142. - ISBN 978-80-89384-04-4

[Dni radiačnej ochrany 2011. 33., Štiavnické vrchy - Vyhne, 7.-11.11.2011]

URL:

<http://inis.iaea.org/search/cache?q=cache:rAnVM0ZgxGoJ:www.iaea.org/inis/collecti>

on/NCLCollectionStore/_Public/43/032/43032925.pdf+inmeta:RN~43032925&access=p&client=inis&filter=p&getfields=* &ie=UTF-8&output=xml_no_dtd&site=inis&num=10&oe=UTF-8&proxystylesheet=inis

AFH02 Moravcsík, Attila 100%: Radón a torón v pobytových priestoroch vybraných lokalít Slovenska a harmonizácia jeho meraní v krajinách Višegrádskej štvorky
Lit. 5 zázn.

In: Študentská vedecká konferencia FMFI UK, Bratislava 2013 : Zborník príspevkov. - Bratislava : Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, 2013. - S. 67. - ISBN 978-80-8147-009-7

[Študentská vedecká konferencia FMFI UK 2013. Bratislava, 23.4.2013]

AFH03 Smetanová, Iveta 23% - Müllerová, Monika 23% - Holý, Karol 23% - Moravcsík, Attila 17% - Kovács, Tibor 2% - Csordás, Anita 2% - Neznal, Martin 2% - Neznal, Matej 2% - Kozak, Krzysztof 2% - Mazur, Jadwiga 2% - Grzadziel, Dominik 2%: Integration measurements of indoor radon and thoron activity concentration in family houses in Ružomberok town (Northern Slovakia)

Lit. 2 zázn.

In: 10th Slovak Geophysical Conference [elektronický zdroj]. - Bratislava : Geophysical Institute, Slovak Academy of Sciences, 2013. - S. 63-64 [CD-ROM]. - ISBN 978-80-85754-27-8

[Slovak Geophysical Conference. 10th, Smolenice, 19.-21.8.2013]

AFH04 Holý, Karol 40% - Moravcsík, Attila 40% - Müllerová, Monika 20%: The study of radon and thoron concentrations in residential houses in the locality of Záhorská Bystrica

In: 36th Days of Radiation Protection : Book of Abstracts. - Bratislava : Slovak Medical University, 2014. - S. 80. - ISBN 978-80-89384-08-2

[Days of Radiation Protection 2014. 36th, Poprad, 10.-14.11.2014]

AFH05 Müllerová, Monika 25% - Holý, Karol 25% - Povinec, Pavel P. 20% - Sýkora, Ivan 18% - Hutka, Miroslav 5% - Moravcsík, Attila 7%: Development of the methods for the measurement of radon exhalation from the materials used in SuperNEMO experiment

In: 36th Days of Radiation Protection : Book of Abstracts. - Bratislava : Slovak Medical University, 2014. - S. 85. - ISBN 978-80-89384-08-2

[Days of Radiation Protection 2014. 36th, Poprad, 10.-14.11.2014]