

**Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Univerzita Komenského**

Rádioaktivita stavebných materiálov u nás a vo svete

Študentská vedecká konferencia 2007

Školiteľ:

Mgr. Monika Müllerová

Autor:

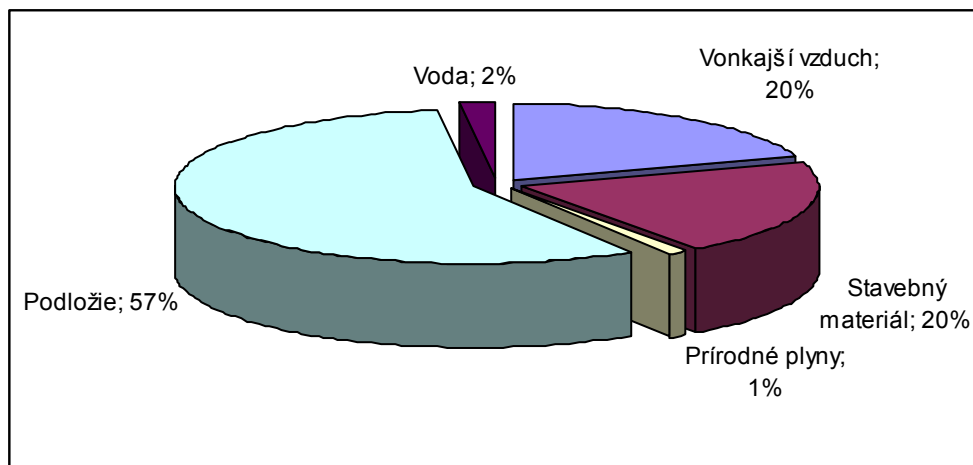
Lucia Báčková

ÚVOD	3
PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	4
I. ZÁKLADNÉ POZNATKY O RADÓNE	4
<i>I.1 Chemické vlastnosti radónu a jeho dcérskych produktov</i>	4
<i>I.2 Fyzikálne vlastnosti radónu</i>	4
<i>I.3 Vplyv radónu na zdravie človeka</i>	4
II. DEFINÍCIA ZÁKLADNÝCH POJMOV	7
III. TEÓRIA EXHALÁCIE RADÓNU Z PÔDY	9
<i>III.1 Emanácia</i>	9
<i>III.2 Difúzia a difúzna rovnica</i>	10
<i>III.3 Konvekcia</i>	11
IV. TEÓRIA EXHALÁCIE RADÓNU ZO STAVEBNÝCH MATERIÁLOV	12
V. MERANIE EXHALAČNEJ RÝCHLOSTI	13
<i>V.1 Plošná akumulčná metóda</i>	13
<i>V.2 Celková exhalácia radónu</i>	14
<i>V.3 Meranie objemovej aktivity ²²²Rn</i>	15
PREHĽAD RÁDIOAKTIVITY STAVEBNÝCH MATERIÁLOV U NÁS A VO SVETE	16
VI. PREHĽAD MERANÍ.....	16
<i>VI.1 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov a legislatívne normy na Slovensku</i> ..	17
<i>VI.2 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov a legislatívne normy v Českej republike</i>	20
<i>VI.3 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov vo Fínsku</i>	22
<i>VI.4 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov v Sýrii</i>	25
<i>VI.5 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov v Hong Kongu</i>	26
<i>VI.6 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov v Maďarsku</i>	27
<i>VI.7 Rádioaktivita stavebných materiálov v niektorých krajinách sveta</i>	28
ZÁVER:	29
POUŽITÁ LITERATÚRA:	31

Úvod

Problematika radiačnej záťaže obyvateľstva je v posledných rokoch vo svete, ale i na Slovensku predmetom zvýšeného záujmu. Dôvodom je značná radiačná záťaž, ku ktorej prispievajú či už prírodné alebo umelé zdroje ionizujúceho žiarenia. Najzávažnejším z prírodných zdrojov je radón ^{222}Rn . Výskumy poukazujú na fakt, že je spolu so svojimi produktmi premeny nezanedbateľným rizikom pre vznik rakoviny pľúc. V rámci opatrení na zníženie radiačnej záťaže obyvateľstva sa sleduje obsah rádionuklidov v materiáloch a surovinách používaných v stavebníctve. Snahou je regulovať veľkosť expozície v pobytovom priestore a teda eliminovať zdravotné riziko ako následok ožiarenia radónom. Preto som sa rozhodla v mojej práci venovať spomínanej problematike. Práca je rozdelená na dva celky. V prvom celku som kapitoly venovala prehľadu súčasných poznatkov súvisiacich s problematikou radónu. V druhom celku je mojím cieľom urobiť prehľad meraní koncentrácie prírodných rádionuklidov v stavebných materiáloch používaných u nás a vo svete. V tejto kapitole taktiež podám obraz radiačnej záťaže na obyvateľov Slovenskej a Českej republiky a uvádzam prehľad právnych a legislatívnych noriem vychádzajúcich z medzinárodných štandardov a požiadaviek.

Obr.I.1: Ilustruje podiel hlavných zdrojov radónu v pobytovom priestore. [6]



Prehľad súčasného stavu problematiky

I. Základné poznatky o radóne

I.1 Chemické vlastnosti radónu a jeho dcérskych produktov

Radón patrí do skupiny vzácnych (inertných) plynov (aerogénov). Radón je dcérskym produktom alfa premeny ^{226}Ra rádia z uránového premenového radu (^{238}U). ^{222}Rn sa ďalej premieňa na svoje dcérske produkty. Sú to ťažké kovy, z ktorých najvýznamnejšie sú krátkožijúce (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po), až po stabilný izotop olova ^{206}Pb . Produkty premeny radónu sú α a β -žiariče. Majú schopnosť zachytávať sa na aerosóloch, prachových časticiach, povrchoch stien, nábytku, šatstva a pod. Atóm radónu má zaplnenú valenčnú vrstvu a elektrónová konfigurácia neutrálneho atómu v základnom stave je: $[\text{Xe}]6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$ [1]. Z elektrónovej štruktúry vyplýva nízka chemická aktivita, hoci vďaka pomerne nízkemu ionizačnému potenciálu (10,7 eV) je schopný tvoriť zlúčeniny s niektorými prvkami, najmä s fluórom. Je dobre rozpustný v studenej vode a ešte lepšie v organických rozpúšťadlách ako sú toluén, benzén, xylén a pod.

I.2 Fyzikálne vlastnosti radónu

Radón je prvok vyskytujúci sa voľne v prírode. Vyskytuje sa všade tam, kde je jeho materský nuklid ^{226}Ra . Radón môže difundovať do materiálov ako je voda, vzduch, a preto ho môžeme nájsť vo všetkých prírodných zložkách ako je geologické podložie, podzemné priestory, vo vode, v ovzduší a tiež aj v ľudských obydlíach. Ľudskými zmyslami je neidentifikovateľný, pretože je za štandardných podmienok bezfarebný, bez chuti a zápachu. ^{222}Rn je prírodný alfa žiarič. Je to najťažší vzácny plyn, teplota topenia je $-71\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota varu je $-61,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota tuhnutia $-113\text{ }^{\circ}\text{C}$, hustota je $9,96\text{ g.cm}^{-3}$ a koeficient rozpustnosti je 0,507 vo vode pri teplote $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a atmosférickom tlaku vzduchu. Rozpustnosť s rastúcou teplotou klesá. Radón je dobre sorbovaný aktívnym uhlím, čo sa využíva pri separácii plynov a následných meraniach.

I.3 Vplyv radónu na zdravie človeka

Problematika rádioaktivity v životnom prostredí je v poslednej dobe mimoriadne citlivo vnímaným fenoménom najmä vďaka nežiadúcemu riziku pre ľudské zdravie. Túto problematiku na svete zastrešujú hlavne dve inštitúcie. Prvou z nich je Vedecký výbor Spojených národov pre účinky atómového žiarenia (UNSCEAR - United Nations Scientific

Committee on the Effects of Atomic Radiation) a Medzinárodná komisia pre rádiologickú ochranu (ICRP - International Commission on Radiological Protection). Jedným zo záverov UNSCEAR je, že prírodné zdroje ionizujúceho žiarenia v priemere prispievajú tromi štvrtinami k celkovému ožiareniu ľudskej populácie. [5]

Vo februári 1998 Národná akadémia vied (NAS- *nezávislá mimovládna vedecká organizácia*) zverejnila správu pod názvom: „Zdravotné účinky expozície radónom“ (správa BEIR VI). NAS v správe udáva, že 5 000 až 22 000 úmrtí na rakovinu pľúc za rok v USA a 12% všetkých úmrtí na rakovinové ochorenia súvisí expozíciou radónom a jeho produktmi premeny. Výbor BEIR IV (Biological Effects of Ionizing Radiation) uviedol, že po fajčení má radón druhý najväčší podiel na úmrtí spôsobenou rakovinou pľúc v USA.

V správe sa ďalej opisuje proces ožiarenia radónom a jeho produktmi premeny. Správa obsahuje aj štúdie, ktoré sa vykonávali niekoľko desaťročí. Epidemiologické štúdie boli vykonané na tisícoch baníkov z uránových baní už viac než 50 rokov v 5 krajinách vrátane USA a Kanady. Tieto štúdie poskytujú presvedčivý dôkaz, že expozícia radónom a jeho produktmi premeny spôsobuje nárast úmrtnosti spôsobenej rakovinou pľúc. Možnosť vzniku rakoviny pľúc je úmerná rozsahu a dĺžke trvania expozície. Okrem štúdie baníkov bola táto úmernosť overená aj experimentálne na zvieratách, ktorým vystavenie sa dlhodobej expozícii spôsobilo rakovinu. Výbor opísal dva možné modely závislosti vzniku rakoviny pľúc pri expozícii. Pri vyhodnotení meraní a ich aplikácii na obyvateľstvo sa vyskytlo niekoľko dôležitých faktorov, ktoré ovplyvnili čo najpresnejší odhad závislosti vzniku rakoviny pľúc na miere expozície. Ako prvý bol fakt, že mnohí baníci fajčili, vdychovali prach a iné emisie v bani. Druhým faktorom je, študovaní boli prevažne muži, ale radónu v obydliach sú vystavované ženy i deti.

Výbor použil údaje zo štúdie na baníkoch, zo štúdií v laboratóriách a zohľadnil aj úroveň radónovej expozície v domovoch obyvateľstva USA. Na základe spomenutých údajov sa podarilo urobiť odhad počtu úmrtí na rakovinu pľúc spôsobenú expozíciou radónom. V roku 1995 umrelo v USA na toto ochorenie 157 400 ľudí: 95 400 mužov, z toho bolo 95% fajčiarov; 62 000 žien, z toho bolo 90% fajčiarok. Približne 11 000 úmrtí nastalo u trvalých nefajčiarov. Z výsledkov štúdií je zrejmé, že fajčenie a expozícia navzájom ovplyvňujú riziko vzniku rakoviny pľúc. Zistili, že pravdepodobnosť vzniku tohto ochorenia z expozície u fajčiarov je desať krát väčšia ako u nefajčiarov. Výbor BEIR IV nakoniec dospel k tomu, že 1 zo 7 všetkých ochorení na rakovinu pľúc je spôsobené expozíciou radónu.

Niektoré vedecké štúdie vyjadrujú, že deti sú citlivejšie na radón. Čo môže byť následkom ich hlbšieho dýchania a tým, že detské bunky sa delia rýchlejšie, a preto viac podliehajú radiačnej záťaži. Medzinárodný výbor pre radiačnú ochranu potvrdil, že pravdepodobnosť vzniku rakoviny pľúc z ožiarenia u detí a mládeže je trojnásobne vyššia ako u dospelých.

Cesty, ktorými radón vniká do ľudského organizmu

Zo zdravotného hľadiska nie je nebezpečný sám radón, ale jeho dcérske produkty, vzniknuté rádioaktívnou premenou radónu. Krátkožijúce izotopy polónia, olova a bizmutu, sú kovovej povahy a v porovnaní s radónom majú vyššiu energiu žiarenia. Určitú dobu môžu existovať vo forme voľných nabitých iónov alebo voľných neutrálnych atómov. Prevažná časť z nich sa však viaže na akékoľvek častice v ovzduší alebo povrchy predmetov. Po spojení produktu premeny s prachovou časticou vzniká vo vzduchu tzv. rádioaktívny aerosól.

Hlavnou cestou expozície dcérskymi produktmi radónu je inhalácia. Radón so svojimi dcérskymi produktmi sa dýchaním vzduchu dostáva do dýchacej sústavy, pričom samotný radón je zväčša vydýchnutý a len nepatrné množstvo sa rozpúšťa v krvi. Dcérske produkty, voľné, alebo zachytené na aerosólové častice, sa usadzujú v prieduškách a pľúcach v oblastiach bifurkačných zón a ožarujú miestne tkanivo ionizujúcim žiarením. Zvlášť významné z tohto hľadiska je žiarenie alfa rádionuklidov polónia ^{214}Po a ^{218}Po , ktoré má vysokú ionizačnú schopnosť. Napríklad častica alfa emitovaná ^{214}Po s energiou 7,687 MeV s doletom 6,95 cm vo vzduchu produkuje 31 tisíc iónových párov na centimetry svojej dráhy. Dolet takejto alfa častice v mäkkých ľudských tkanivách je porovnateľný s doletom vo vode, ktorý je okolo 90 μm . Nakoľko bunkový epitel pľúc nechráni zrohovatená vrstva, na rozdiel od vonkajších častí kože, môžu častice alfa spôsobovať ionizáciu aj vo vrstve bazálnych buniek, u ktorých prebieha bunkové delenie. Toto ožarovanie je jedným z významných faktorov podieľajúcich sa na vzniku karcinómu pľúc. [8]

Radón môže do organizmu vnikáť aj tráviacim ústrojenstvom. Zdravotné riziko predstavuje pitná voda s radónom, ktorý ožaruje citlivé bunky v gastrointestinálnom trakte. Absorpciou sa dostáva do krvi a je rozvádzaný i do iných tkanív. Dcérske produkty radónu sa usadzujú a hromadia v niektorých orgánoch, napr. olovo a polónium v kostiach, a dlhodobo ich ožarujú. Niektoré epidemiologické štúdie dokazujú, že expozícia radónom je spojená s výskytom leukémie u detí i dospelých. [8]

II. Definícia základných pojmov

Aktivita je veličina charakterizujúca počet rádioaktívnych premien za jednotku času. Je definovaná vzťahom:

$$A = \frac{dN}{dt}, \quad (\text{II.1})$$

kde dN je stredný počet atómov premenených v časovom intervale dt . Jednotkou je Becquerel $[Bq]=[s^{-1}]$, čo znamená jednu rádioaktívnu premenu za jednu sekundu.

Konštanta premeny λ udáva pomer počtu atómov premenených za sekundu k celkovému počtu atómov rádionuklidu v danej vzorke. Je daná vzťahom:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad (\text{II.2})$$

kde $T_{1/2}$ je doba polpremeny. Je to doba, za ktorú sa samovoľne premení polovica atómov určitého prvku v danom materiále. Jednotkou je $[s^{-1}]$.

Vlhkosť pôdy je pomer hmotnosti vody v pôde k hmotnosti vysušenej pôdy rovnakého objemu. Udáva sa v percentách:

$$w = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100, \quad (\text{II.3})$$

kde: m_v hmotnosť vlhkej pôdy $[kg]$,

m_s hmotnosť suchej pôdy $[kg]$.

Porozita definuje percentuálny podiel pórov v celkovom objeme pôdy. Póry sú zväčša vyplnené pôdnym vzduchom alebo vodou. Porozita materiálu ε je pomer objemu pórov V_p ku celkovému objemu V vzorky:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_d} = F_p - w, \quad (\text{II.4})$$

kde: V_p objem pórov $[m^3]$,

V celkový objem pôdy $[m^3]$,

ρ_s hustota, t.j. hmotnosť jednotky objemu pôdy bez medzier a pórov,

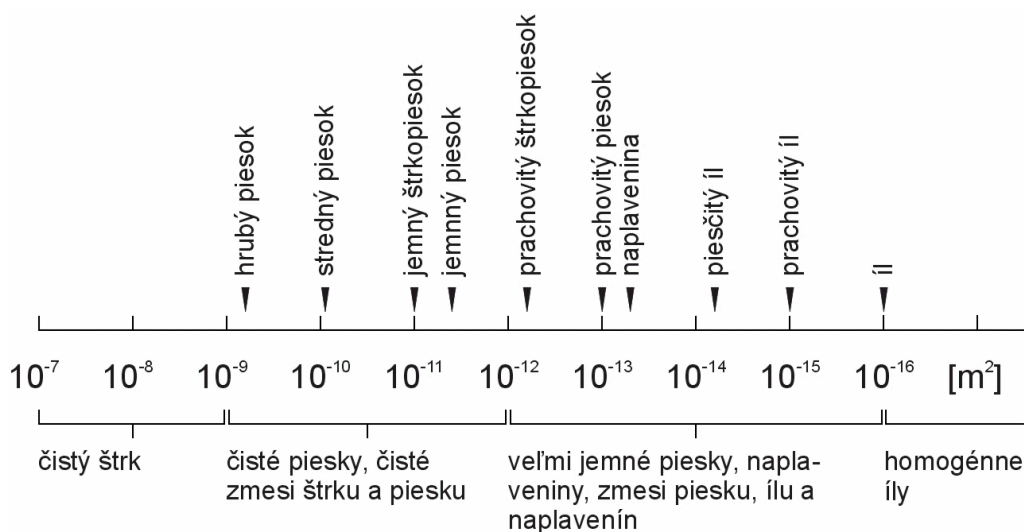
ρ_d objemová hustota, t.j. hmotnosť jednotky objemu pôdy v prirodzenom stave vrátane medzier a pórov,

F_p absolútna pórovitosť,

w vlhkosť pôdy.

Permeabilita charakterizuje priepustnosť pôdy pre vodu a plyny. Pohybuje sa v rozsahu od $10^{-7} m^2$ pre štrk až po $10^{-16} m^2$ pre piesočnatú hlinu.

Obr.II.1: Permeabilita zemín. [12]



Tortuozita T charakterizuje nejednoznačnosť dráhy pri difúzii. Nadobúda hodnoty od 1,4 do 2,5. Tento parameter je dôležitý pri určovaní permeability k danej vzťahom:

$$k = \frac{c\varepsilon}{TS^2} \quad (\text{II.5})$$

$$S = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} \quad (\text{II.6})$$

kde: c konštanta závislá na tvare pórov,
 S špecifická plocha povrchu, pre jednotvárne sférické častice,
 d priemer častíc pôdy.

Efektívny difúzny koeficient radónu je charakterizovaný tokom cez jednotkový prierez objemu pórov, ktorý je spôsobený gradientom koncentrácie pórov

$$D_{ef} = \varepsilon \cdot D, \quad (\text{II.7})$$

kde: D difúzny koeficient.

Difúzna dĺžka radónu

$$L = \sqrt{\frac{D_{ef}}{\lambda}}. \quad (\text{II.8})$$

Objemová aktivita radónu (OAR) je veličina charakterizujúca stredný počet rádioaktívnych premien za jednotku času v jednotkovom objeme. Je daná vzťahom:

$A_v = \frac{A}{V}$, kde A je objemová aktivita rádioaktívnej látky s objemom V . Jej jednotka je $[Bq \cdot m^{-3}]$.

Ekvivalentná objemová aktivita radónu (EOAR) je objemová aktivita radónu v rádioaktívnej rovnováhe s dcérskymi produktmi, ktorých latentná energia sa rovná latentnej energii danej nerovnovážnej zmesi dcérskych produktov radónu.

III. Teória exhalácie radónu z pôdy

Únik radónu do životného prostredia sa uskutočňuje 3 mechanizmami:

- Emanácia - Uvoľňovanie zo zŕn obsahujúcich ^{226}Ra je charakterizovaná emanačným koeficientom
- Difúzia - Transport radónu v pôde je charakterizovaný difúznym koeficientom pre danú látku
- Exhalácia - Únik z povrchu tuhej latky alebo pôdy do atmosféry je charakterizovaný exhalačnou rýchlosťou

Všetky spomenuté procesy sú silne ovplyvnené meteorologickými faktormi.

III.1 Emanácia

Atómy radónu migrujú v kryštalickej mriežke k povrchu alebo k defektom v mriežke. Tak atómy preniknú do pórov a trhlín v materiále. Emanácia je kvantitatívne charakterizovaná emanačným koeficientom (K_e), čo je podiel počtu atómov, ktoré uniknú do pórov k celkovému počtu atómov radónu, ktoré vznikli rádioaktívnou premenou rádia za jednotku času na jednotku objemu. Emanácia výrazne závisí od vlhkosti materiálu, teploty prostredia a tlaku.[2] Emanáčny koeficient je u pôdy definovaný vzťahom:

$$K_e = \frac{n_p}{n_c}, \quad (\text{III.1})$$

kde: n_p počet atómov ^{222}Rn , ktoré uniknú do pôdneho vzduchu na objem pôdneho vzduchu za jednotku času,

n_c celkový počet vzniknutých atómov ^{222}Rn na objem pôdy a za jednotku času.

Iba časť radónu, vzniknutom v pôde daná emanačným koeficientom K_e prenikne do pórov v pôde a v nej voľne difunduje. Podiel radónu prístupného difúzii je daný rýchlosťou produkcie radónu Q . Pre pôdu je určená [4]

$$Q = \frac{K_e \lambda_{\text{Ra}} N_{\text{Ra}}}{F_p - w}, \quad (\text{III.2})$$

kde λ_{Ra} a N_{Ra} sú konštanty premeny a objemová koncentrácia ^{226}Ra , F_p je pórovitosť pôdy a w je objemová vlhkosť pôdy.

III.2 Difúzia a difúzna rovnica

Radón má schopnosť difundovať z pevných materiálov samovoľnou difúziou alebo difúziou spôsobenou vonkajšími silami. S procesom difúzie súvisí množstvo uvoľneného radónu zo stavebných materiálov do priestoru budov. Ak zanedbáme pohyb plynu spôsobený vplyvom tlakového rozdielu potom môžeme pohyb radónu cez materiál popísať prvým Fickovým zákonom[12]

$$\vec{j} = -D \cdot \vec{\nabla} C, \quad (III.3)$$

$$D_{ef} = \varepsilon D, \quad (III.4)$$

kde: \vec{j} tok objemovej aktivity radónu,
 C koncentrácia radónu v látke [$Bq \cdot m^{-3}$],
 D difúzny koeficient [$m^2 \cdot s^{-1}$],
 ε porozita materiálu.

Zmena objemovej aktivity pri transporte radónu cez materiál je popísaná diferenciálnou rovnicou (druhý Fickov zákon)

$$\frac{\partial C(t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(t)}{\partial x^2} - \lambda C(t) + Q, \quad (III.5)$$

kde: λ_{Rn} premenová konštantka radónu,
 Q rýchlosť produkcie radónu v difúznom materiále.

Difúziu pevného materiálu vyšetrujeme pre stacionárny stav to znamená $\frac{\partial C}{\partial t} = 0, C = C(x)$.

Preto $D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + Q - \lambda_{Rn} C = 0$.

Rovnicu môžeme prepísať do tvaru: $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{Q}{D} - \left(\frac{\lambda_{Rn}}{D}\right)C = 0$, riešením ktorej dostaneme

$$C(x) = \frac{Q}{\varepsilon \cdot \lambda} \left(1 - e^{-\frac{x}{L}}\right). \quad (III.6)$$

Pre aktivitu radónu v pôde platí: $A(x) = \frac{K_e \cdot A_{Ra}}{\varepsilon} \left(1 - e^{-\frac{x}{L}}\right). \quad (III.7)$

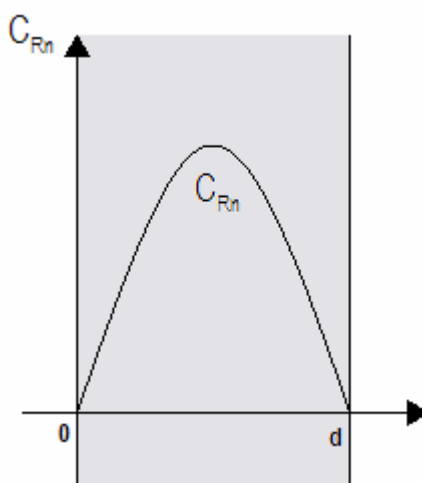
Pre exhaláciu radónu z povrchu ($x=0$):

$$E(x=0) = -K_e \cdot \lambda \cdot A_{Ra} \cdot L. \quad (III.8)$$

Tab. III.2: Hodnoty difúzneho koeficientu pre rôzne materiály.[4]

Materiál	Difúzny koeficient pri 20 °C [m ² .s ⁻¹]
Vzduch	1,03.10 ⁻⁵
Voda	1,4.10 ⁻⁹
Piesok	3.10 ⁻⁶
Ílovitá pôda	8.10 ⁻⁹
Kryštalická látka	10 ⁻¹³ -10 ⁻²⁴

Obr.III.1: Obrázok popisuje exhaláciu radónu zo steny za predpokladu, že transport v stene je len difúziou.



III.3 Konvekcia

Ďalšou možnosťou transportu radónu, je jeho prúdenie – konvekcia s pôdnym vzduchom cez trhliny a póry hornín a pórovitých materiálov. Konvektívne prúdenie je spôsobené zmenou fyzikálnych podmienok prostredia gradientom tlaku, teploty. Konvekciou sa radón môže šíriť do vzdialenosti 150-200 m [4]

Pre priblíženie prúdenia ²²²Rn v pôdnom vzduchu použijeme model tekutiny. Použijeme Darcyho zákon, hovoriaci o rýchlosti tekutiny \mathbf{v} , daný vzťahom:

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \vec{\nabla} \bar{p}, \quad (\text{III.9})$$

kde: k permeabilita,
 μ viskozita,
 $\vec{\nabla} \bar{p}$ tlakový gradient.

Pre konvektívny transport platí:

$$\vec{j} = \frac{c\vec{v}}{\varepsilon}. \quad (\text{III.10})$$

IV. Teória exhalácie radónu zo stavebných materiálov

Jedným zo zdrojov radónu vo vnútri objektu sú stavebné materiály, ktoré sú súčasťou stien a podláh. Ich základom sú väčšinou horniny a zeminy s veľmi rozdielnym obsahom ^{226}Ra a následne vznikajúceho radónu. Tieto materiály nie sú zvyčajne používané v pôvodnej forme, ale sú drvené, mleté a tepelne upravované, čo môže viesť k zvýšenému uvoľňovaniu radónu z povrchu zrn a tým aj z povrchu stavebného materiálu do interiéru.

Miera transportu radónu cez povrch medzi pevnou látkou a atmosférou je vyjadrená exhaláciou radónu. Pevnou látkou môže byť pôda, stavebné materiály a pod., kým za atmosféru môžeme považovať uzavretú nádobu, budovu alebo otvorený vzduch. Exhalácia je kvantitatívne charakterizovaná exhalačnou rýchlosťou.[4]

Exhalačnú rýchlosť ^{222}Rn z materiálu môže byť vyjadrená vzťahom:

$$E_t = -F_p \cdot D_{ef} \cdot \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=d}, \quad (\text{IV.1})$$

kde: d polovičná hrúbka steny,

F_p pórovitosť materiálu.

Riešením rovnice difúzie pre stacionárny tvar a dosadením výsledku do rovnice (IV.1) dostaneme pre plošnú exhalačnú rýchlosť radónu vzťah:

$$E_s = F_p \cdot Q \cdot L \cdot \tanh \frac{d}{L}. \quad (\text{IV.2})$$

Kde Q je rýchlosť produkcie radónu v póroch materiálu na jednotku objemu vzduchu a môžeme ju vyjadriť rovnicou[10]:

$$Q = \frac{1}{F_p} \cdot \lambda \cdot A_{Ra} \cdot \rho \cdot K_e. \quad (\text{IV.3})$$

Tab.IV.1: Emanáčny koeficient a difúzna dĺžka ^{222}Rn v niektorých stavebných materiáloch. [12]

Typ stavebného materiálu	Emanáčny koeficient	Difúzna dĺžka [m]
Betón	0,1-0,4	0,06-0,2
Tehla	0,02-0,1	0,2-0,4
Sádra	0,03-0,2	0,8-1,3
Cement	0,02-0,05	-
Popolček	0,002-0,02	-

V. Meranie exhalačnej rýchlosti

Exhalácia je miera transportu radónu cez povrch látky do atmosféry.[4] Exhalačnú rýchlosť je možné merať v laboratóriu, ale i priamo v teréne. Na meranie exhalačnej rýchlosti sa najčastejšie používa tzv. akumuláčna metóda merania.

Metódy merania exhalačnej rýchlosti sú založené na meraní objemovej aktivity radónu (OAR) vzduchu uvoľnenej zo vzorky v uzavretej nádobe.

V.1 Plošná akumuláčna metóda

Akumuláčna metóda je založená na umiestnení valcovej nádoby otvorenou stranou na povrch pôdy. Nárast koncentrácie ^{222}Rn sa meria v časových intervaloch. Pre koncentráciu c radónu za ideálnych podmienok platí:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{j \cdot S}{V} - \lambda_{\text{Rn}} \cdot C - \lambda_b \cdot C \quad (\text{V.1})$$

Kde: j plošná exhalačná rýchlosť,
 S plocha podstavy,
 V objem,
 λ_b konštanta charakterizujúca spätnú difúziu a únik ^{222}Rn z nádoby

Nárast koncentrácie C v nádobe potom opíšeme rovnicou:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{j \cdot S}{V} - \lambda_{\text{Rn}} \cdot C - \lambda_b \cdot C \quad (\text{V.2})$$

Vzťah pre aktivitu ^{222}Rn koncentrovanú v akumuláčnej nádobe dostaneme riešením (V.2) s počiatočnými podmienkami $C(t=0)=0$.

$$A_V = \frac{E_S \cdot S}{V \cdot \lambda^*} (1 - e^{-\lambda^* t}), \quad (\text{V.3})$$

kde: A_V objemová aktivita ^{222}Rn v čase $t = 0$ [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$],
 E_S plošná exhalačná rýchlosť ^{222}Rn [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$].

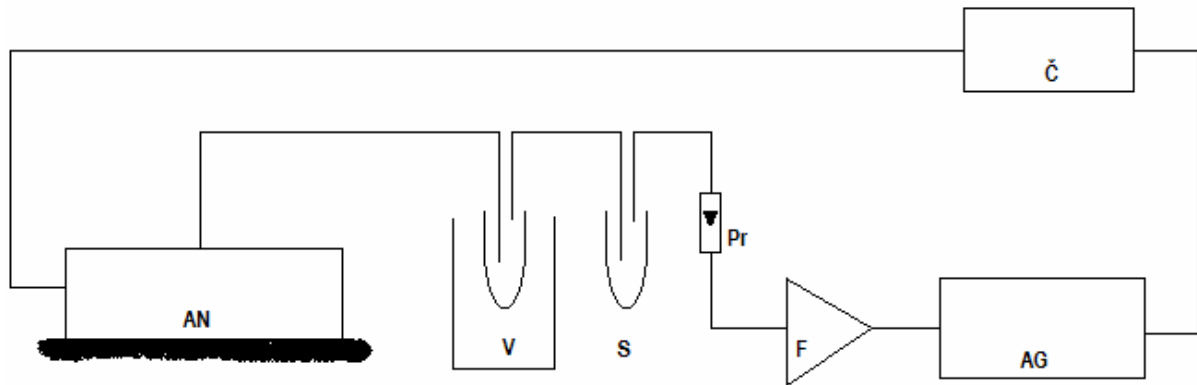
Pre dobu akumulácie $t \ll \frac{1}{\lambda^*}$ dostávame zo vzťahu (V.3) rovnicu:

$$A_V = \frac{E_S \cdot S}{V} t. \quad (\text{V.4})$$

Pre dobu akumulácie $t \gg \frac{1}{\lambda^*}$ dostávame pre koncentráciu aktivity ^{222}Rn nasýtenú hodnotu:

$$A_V = \frac{E_S \cdot S}{V \cdot \lambda^*} t. \quad (\text{V.5})$$

Obr.V.1: Schéma aparatury na meranie plošnej exhaláčnej rýchlosti ^{222}Rn . Č – čerpadlo, AN- akumuláčná nádoba, V- vymrazovačka, S- silikagél, P- prietokomer, F- filter, AG- Alpha Guard. [18]



V.2 Celková exhalácia radónu

Exhaláciu radónu z poréznych materiálov (ako napr. pôda, hornina, stavebný materiál) je možné určiť štúdiom nárastu aktivity ^{222}Rn v akumuláčnej nádobe obsahujúcej vzorku daného materiálu.

V ideálnom prípade je aktivita radónu v akumuláčnej nádobe opísaná rovnicou:

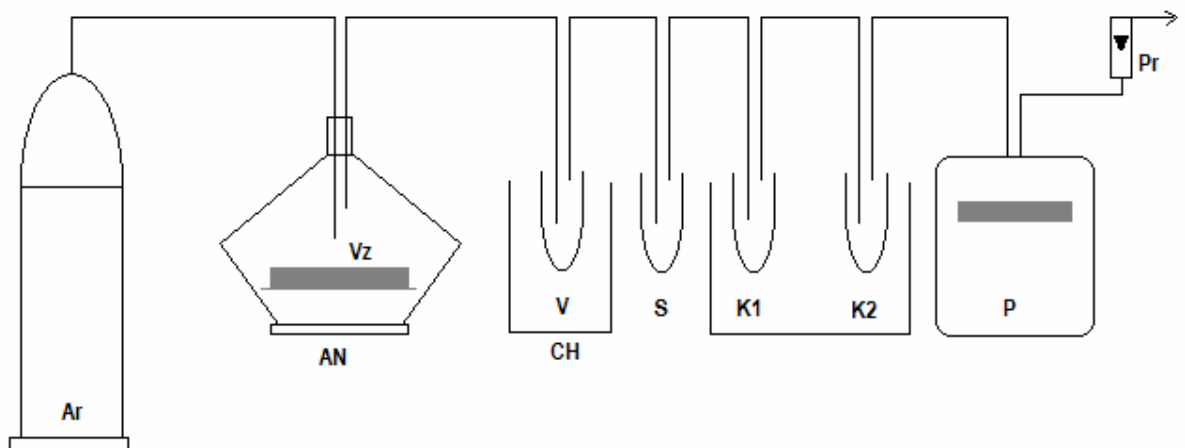
$$A_V = \frac{E}{V\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda t}), \quad (\text{V.6})$$

kde: A_V objemová aktivita radónu [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$] vo vzduchu nádoby s objemom V [m^3] na konci doby hromadenia t [s],

E celková exhaláčná rýchlosť [$\text{Bq} \cdot \text{s}^{-1}$],

λ konštanta premeny ^{222}Rn [$2,1 \cdot 10^{-6} \cdot \text{s}^{-1}$].

Obr.V.2: Schéma aparatury pre meranie celkovej exhaláčnej rýchlosti. Ar argón, Vz- vzorka materiálu, AN- akumuláčná nádoba, V- vymrazovačka, S- silikagél, K1, K2- kolónky s aktívnym uhlím, CH- nádoba s tekutým dusíkom, P- plynomer, Pr- prietokomer



Rovnica (V.6) je platná len v prípade ak:

- (i) nedochádza k úniku radónu z akumuláčnej nádoby
- (ii) koncentrácia radónu vo vzduchu akumuláčnej nádoby je nižšia než koncentrácia radónu vo vzduchu nachádzajúceho sa v póroch danej vzorky.

Ak koncentrácia radónu vo vzduchu nádoby sa priblíži ku koncentrácii radónu vo „vzduchu“ vzorky, dochádza k tzv. spätnej difúzii t.j. atómy majú tendenciu difundovať späť do vzorky.

Ak pri výpočtoch uvažujeme aj spätnú difúziu a únik radónu z nádoby, rovnica (V.6) sa pretransformuje do tvaru

$$A_V = \frac{E}{V\lambda^*} \cdot (1 - e^{-\lambda^* t}) \quad (\text{V.7})$$

kde: $\lambda^* = \lambda + \lambda_b$, λ_b je korekcia konštanty premeny na spätnú difúziu a úniky.

Ak je hrúbka vzoriek daného materiálu (napr. pôd) umiestnených v akumuláčnej nádobe v porovnaní s difúznou dĺžkou (L) ^{222}Rn malá, tak vzťah medzi exhalačnou rýchlosťou a emanačným koeficientom možno vyjadriť nasledovne:[7]

$$K_e = \frac{E}{\lambda M A_{Ra}}, \quad (\text{V.8})$$

- kde: K_e emanačný koeficient,
 E celková exhalačná rýchlosť ^{222}Rn [$\text{Bq}\cdot\text{s}^{-1}$],
 λ konštantu premeny ^{222}Rn [s^{-1}],
 M hmotnosť suchej vzorky [kg],
 A_{Ra} hmotnostná aktivita ^{226}Ra vo vzorke [$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$].

Aj proces exhalácie radónu závisí od viacerých faktorov ako napr. vlhkosť alebo teplota vzorky.

V.3 Meranie objemovej aktivity ^{222}Rn

Scintilačné komory (Lukasové komôrky)

Je to najstarší a zároveň najpoužívanejší typ detektora na určenie objemovej aktivity ^{222}Rn (ďalej OAR). Metóda je založená na skutočnosti, že nabité častice vyvolávajú v niektorých luminiscenčných látkach krátke záblesky. Komôrky sú rôznych veľkostí (90 ml – 5 l). Obvykle sú vyrobené zo skla, kovu a plastu s jedným alebo dvoma ventilmi. Vnútorňa stena je pokrytá luminiscenčnou látkou *ZnS(Ag)-sulfid zinočnatý aktivovaný striebrom*. Pri meraní sa najprv vyčerpá vzduch z komory, následne sa do nej nasaje meraná vzorka obsahujúca ^{222}Rn .

Pri interakcii α - častíc, uvoľnených zo vzorky, so stenou scintilátora vznikajú svetelné záblesky, ktoré sú zosilnené fotonásobičom a prevedené na elektrické signály (impulzy napätia) a tie sú registrované čítacím zariadením.

Záchyt na aktívnom uhlí

Na určenie nízkych koncentrácií radónu sa používa odber vzorky na aktívne uhlie.[1,2] Pri tejto metóde sa využíva schopnosť absorpcie radónu aktívnym uhlím. Do pracovného priestoru cez difúziu bariéru priestoru, v ktorom je umiestnené aktívne uhlie preniká ^{222}Rn . Po ukončení expozície sa množstvo radónu absorbovaného uhlím určuje pomocou detekcie α, β alebo γ žiarenia emitovaného jeho dcérskeho produktov.

Monitor radónu Alpha Guard

Alpha Guard PQ 2000/MC 50 od firmy Genitron je multiparametrový radónový monitor. Je to trojrozmerný α - spektrometer s inonizačnou komorou v tvare valca ako detektorom radónu, ktorého aktívny objem je 0,56 l. Do objemu komory vchádza vzduch cez filter zo sklenených vlákien. Detektor môže pracovať v difúznom alebo prietokovom režime. Citlivosť ionizačnej komory je 0,5 imp/min na 1 Bq/m^3 aktivity ^{222}Rn .

Prehľad rádioaktivity stavebných materiálov u nás a vo svete

VI. Prehľad meraní

Najvýznamnejšou časťou k celkovému ožiareniu populácie prispieva ^{222}Rn a inhalácia jeho produktov premeny (cca. 45 %). Priemerná objemová aktivita ^{222}Rn v bytoch sa líši v jednotlivých krajinách a pohybuje sa v rozmedzí 10 až 100 Bq.m^{-3} , pričom celosvetový aritmetický priemer je 40 Bq.m^{-3} . [5] Monitorovanie ^{222}Rn v bytoch a na pracoviskách na Slovensku organizoval Ústav preventívnej a klinickej medicíny v Bratislave v spolupráci so štátnymi zdravotnými ústavmi. Výsledkom tejto štúdie bolo zistenie, že na Slovensku je priemerná objemová aktivita ^{222}Rn v bytoch 120 Bq.m^{-3} (48 Bq.m^{-3} ekvivalentnej objemovej aktivity radónu) čo nás radí medzi štáty s vyšším radónovým rizikom. [7] Ďalším zistením týchto štúdií je skutočnosť, že byty s objemovou aktivitou v rozmedzí 200 až 2000 Bq.m^{-3} sa vyskytujú v počte, ktorý nemožno jednoducho zanedbať. Riziko ohrozenia zdravia pri mnohoročnom pobyte v priestoroch s objemovou aktivitou nad 2000 Bq.m^{-3} je dokonca vyššie ako pri fajčení cigariet.

Tab.VI.1: Prípustné hodnoty EOAR vo vnútornom prostredí budov v rôznych krajinách. [4]

Krajina	Existujúce budovy EOAR [Bq.m ⁻³]	Nové budovy EOAR [Bq.m ⁻³]
Austrália	200	200
Česká republika	200	100
Európske spoločenstvo	400	200
Fínsko	400	200
Kanada	800	800
Litva	100	50
Nemecko	250	250
Nórsko	800	200
Rakúsko	400	400
Slovenská republika	200	100
Švajčiarsko	1000	400
USA	150	hodn. vonk. vzduchu
Švédsko	400	200

VI.1 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov a legislatívne normy na Slovensku

Na Slovensku sa problematikou ionizujúceho žiarenia zaoberá niekoľko inštitúcií. Z hľadiska ochrany zdravia sú to najmä Štátny zdravotný ústav a Ústav preventívnej a klinickej medicíny. Problematiku monitorovania životného prostredia riadi a organizuje Slovenské ústredie radiačnej monitorovacej siete. Jednu zo zložiek monitorovacej siete tvorí aj Slovenský hydrometeorologický ústav, ktorý spravuje sieť rýchleho varovania pracujúcu na báze monitorovania gama žiarenia v ovzduší.

V Slovenskej republike je od 2. februára 2006 hlavným legislatívnym podkladom zákon č. 126/2006. Z. z. o verejnom zdravotníctve a o zmene a doplnení niektorých, na základe ktorého bolo vydané nariadenie vlády č. 350/2006, ktorým sa ustanovujú podrobnosti o požiadavkách na obmedzenie ožiarenia z prírodného žiarenia; 340/2006 o ochrane zdravia osôb pred nepriaznivými účinkami ionizujúceho žiarenia pri lekárskom ožiarení; 347/2006 nariadenie, ktorým sa ustanovujú podrobnosti o radiačnej monitorovacej sieti.

V nariadeniach sú uvedené konkrétne hodnoty odvodených zásahových úrovní, pri prekročení ktorých je potrebné vykonať opatrenia proti prenikaniu radónu do pobytových priestorov. [8]

V nariadení č. 350/2006 sú ustanovené najvyššie prípustné hodnoty indexu hmotnostnej aktivity pre obsah rádionuklidov v stavebných materiáloch a frekvencia meraní tohto obsahu. Index hmotnostnej aktivity je bezrozmerná veličina a je daná vzťahom:

$$I = \frac{a_{Ra}}{300} + \frac{a_{Th}}{200} + \frac{a_K}{3000}$$

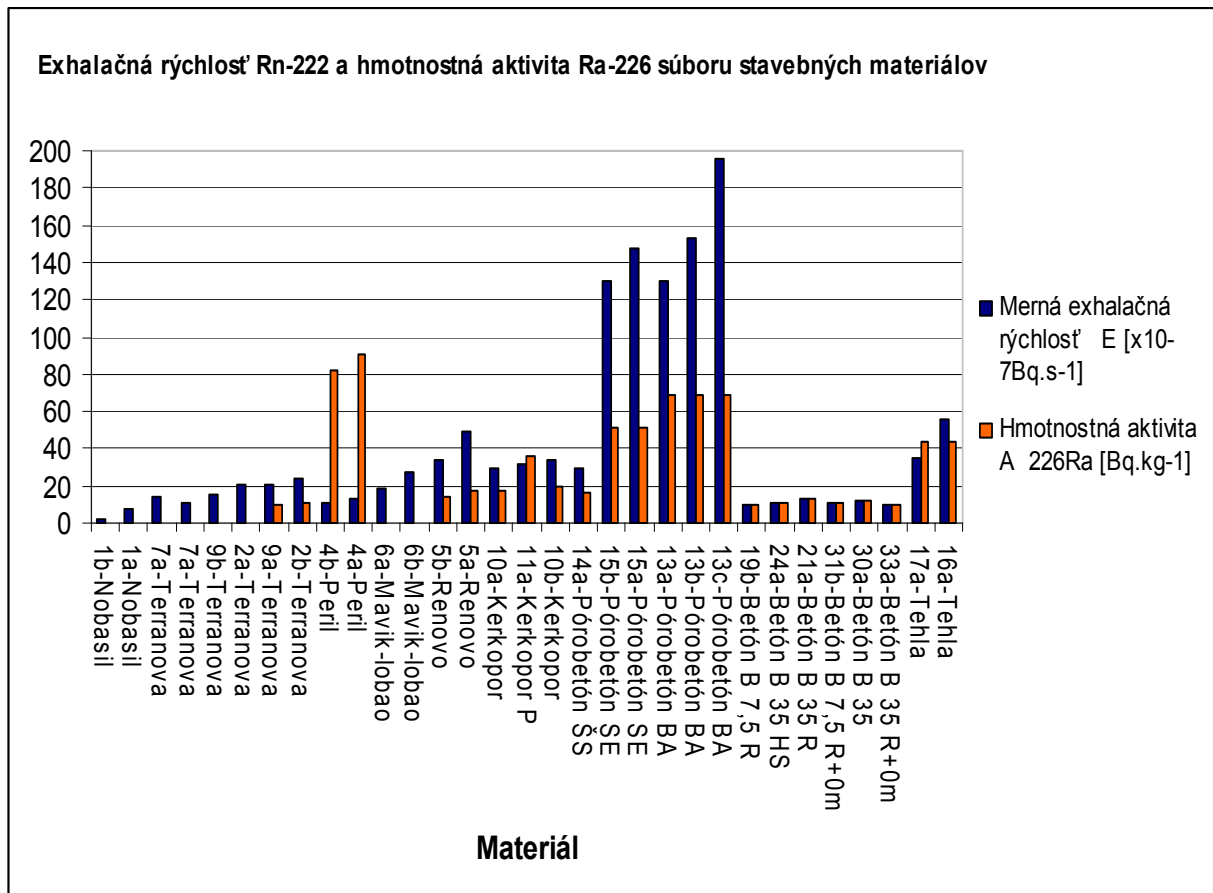
kde: a_x hmotnostná aktivita X v stavebnom materiáli.

Komplexné merania rádioaktivity rôznych stavebných materiálov prebiehali na KJF. Súbor dát bol publikovaný v správe [10]

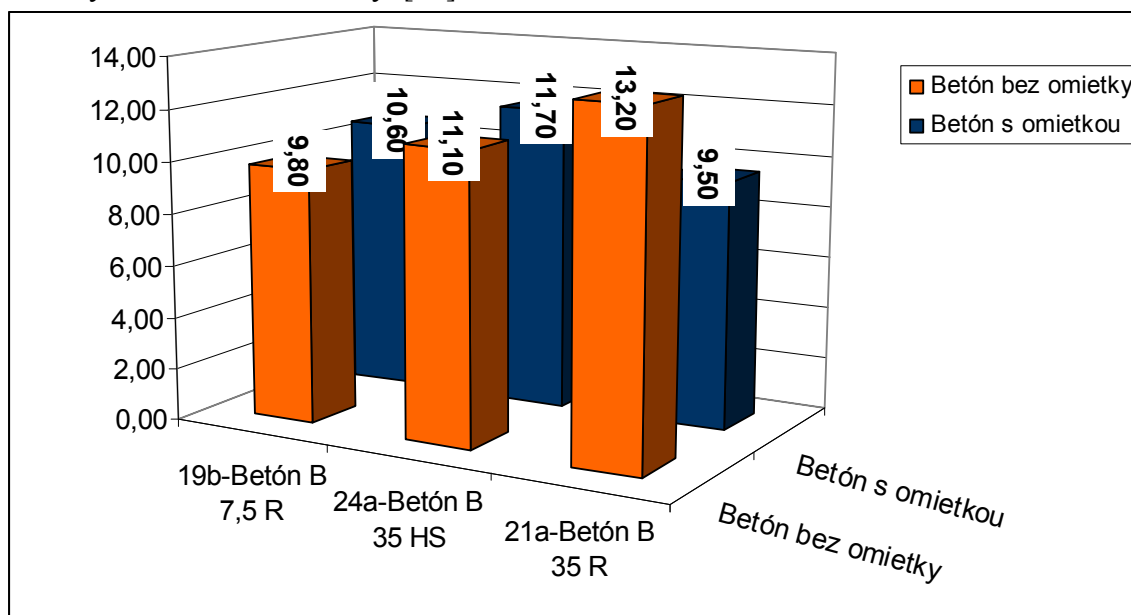
Tab.IV.2: V tabuľke sú priemerné hodnoty hmotnostnej exhalačnej rýchlosti a hmotnostnej aktivity ^{226}Ra vzoriek stavebných materiálov dostupných na Slovensku. [10]

Názov a typ vzorky	Priemerná hmotnostná exhalačná rýchlosť E [$\times 10^{-7} \text{Bq.s}^{-1}$]	Hmotnostná aktivita A ^{226}Ra [Bq.kg^{-1}]
1b-Nobasil	2	-
1a-Nobasil	8	-
7a-Terranova	13,90	-
7a-Terranova	10,40	-
9b-Terranova	15,40	-
2a-Terranova	21,10	-
9a-Terranova	21,00	9,4
2b-Terranova	24,30	10,7
4b-Peril	11,40	81,60
4a-Peril	13,60	90,40
6a-Mavik-lobao	18,60	-
6b-Mavik-lobao	27,60	-
5b-Renovo	33,70	14,70
5a-Renovo	49,30	17,50
10a-Kerkopor	29,50	18,00
11a-Kerkopor P	31,50	36,30
10b-Kerkopor	34,20	20,20
14a-Pórobetón ŠS	29,80	16,40
15b-Pórobetón SE	129,90	51,10
15a-Pórobetón SE	147,20	51,10
13a-Pórobetón BA	130,30	68,80
13b-Pórobetón BA	153,10	68,80
13c-Pórobetón BA	196,10	68,80
19b-Betón B 7,5 R	9,80	9,80
24a-Betón B 35 HS	11,10	11,10
21a-Betón B 35 R	13,20	13,20
31b-Betón B 7,5 R+0m	10,60	10,60
30a-Betón B 35 HS+0m	11,70	11,70
33a-Betón B 35 R+0m	9,50	9,50
17a-Tehla	35,10	43,60
16a-Tehla	55,70	43,40

Obr.VI.1: Obrázok ilustruje porovnanie hmotnostnej exhalačnej rýchlosti ^{222}Rn a hmotnostnej aktivity ^{226}Ra súboru stavebných materiálov používaných v stavebníctve na SR. [10]



Obr.VI.2: Obrázok ilustruje porovnanie exhalačnej rýchlosti ^{222}Rn betónu potretého vrstvou omietky a betónu bez omietky. [10]



VI.2 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov a legislatívne normy v Českej republike

V Českej republike sa problematikou inonizujúceho žiarenia zaoberá organizácia Štátny ústav radiačnej ochrany (SÚRO), ktorý bol zriadený rozhodnutím predsedu Štátneho úradu pre jadrovú bezpečnosť ČR (SÚJB) 1.7.1995. Ústav je rozpočtovou organizáciou SÚJB so sídlom v Prahe. Práca SÚRO nadväzuje na dlhoročnú činnosť Centra hygieny žiarenia Štátneho zdravotníckeho ústavu. Náplňou ústavu je hlavne zaistenie činnosti monitorovacej siete ČR (RMS pozostáva z cca 50 meracích oblastí a celkovo zo 184 monitorovacích bodov), analýza radiačných nehôd, vyhľadávanie budov so zvýšenou koncentráciou radónu (prírodné rádionuklidy v stavebných materiáloch), taktiež aj experimentálna činnosť (vypracovaní odborných správ, posudkov na základe expertíz a výskumov).

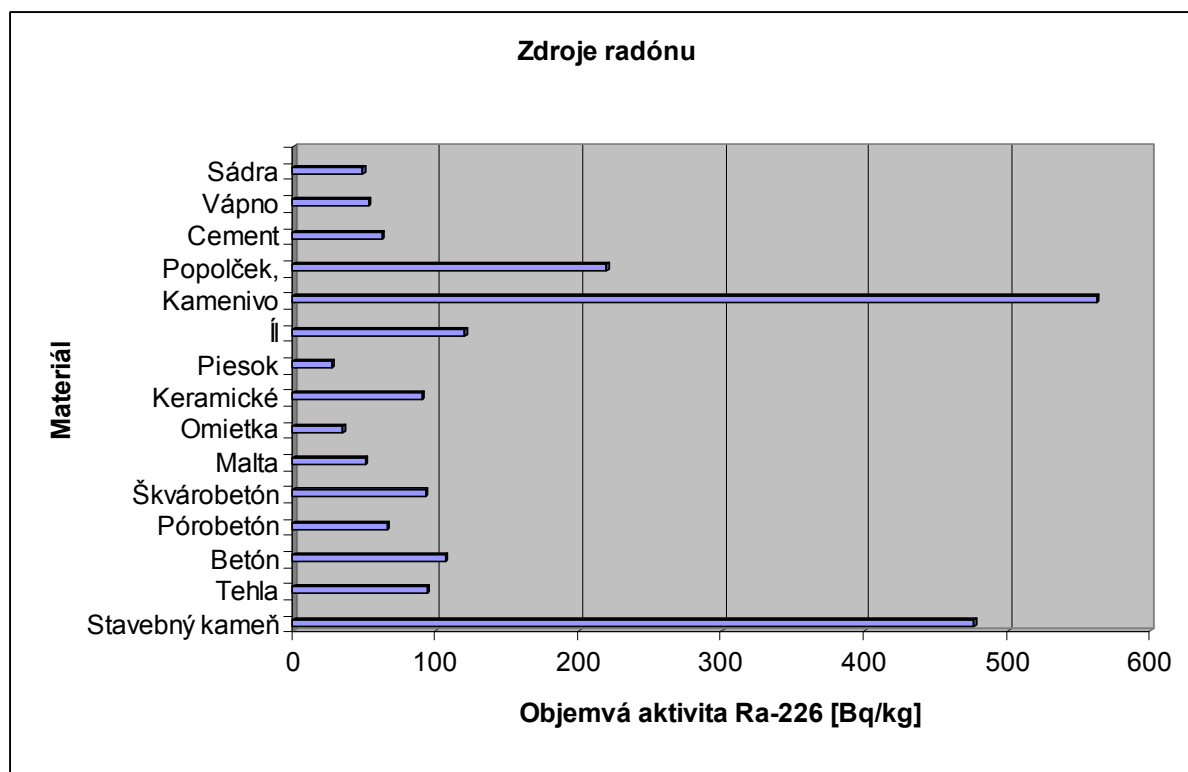
V Českej republike sa prijatím novely zákona 13/2002 Z. z. o mierovom používaní jadrovej energie a ionizujúceho žiarenia podarilo dosiahnuť úplnú harmóniu českého práva s právom európskeho spoločenstva (ES). Vyhlášky doplňujúce podrobnosti tohto zákona: Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiačnej ochrane, Vyhláška č. 319/2002 Sb., o funkcii a organizácii celoštátnej radiačnej monitorovacej siete.

Obsah rádia v stavebných materiáloch používaných v ČR je obvykle v desiatkach Bq/kg. Vyššie hodnoty - vykazujú materiály vyrobené s použitím odpadových surovín (popolček, škvára, truska) alebo niektoré druhy kameňa napr. žula. V tabuľke sú uvedené priemerné a maximálne hodnoty obsahu rádia v stavebných materiáloch používaných v ČR v období 1998 – 1999. Odhad priemerného ožiarovania obyvateľstva zo stavebných materiálov v ČR je 0,4 až 0,6 mSv za rok (výsledky získane z meraní v roku 1999).

Tab.VI.3: V tabuľke sú priemerné a maximálne hodnoty obsahu rádia v stavebných materiáloch používaných v ČR. [17]

Materiál	Hodnota	Rádioaktivita ^{226}Ra [Bq.kg ⁻¹]
Stavebný kameň	max	925,0
	priemer	27,5
Tehla	max	143,0
	priemer	45,2
Betón	max	192,0
	priemer	21,1
Pórobetón	max	85,0
	priemer	46,1
Škvárobetón	max	118,0
	priemer	66,7
Malta	max	82,0
	priemer	19,8
Omietka	max	56,0
	priemer	13,9
Keramické obklady	max	117,0
	priemer	63,0
Piesok	max	41,0
	priemer	13,3
Íl	max	199,0
	priemer	40,9
Kamenivo	max	1090,0
	priemer	34,9
Popolček, škvára	max	363,0
	priemer	75,5
Cement	max	88,0
	priemer	36,5
Vápno	max	94,0
	priemer	12,5
Sádra	max	86,0
	priemer	12,1

Obr.VI.3: Obrázok ilustruje porovnanie hmotnostnej aktivity ^{226}Ra v materiáloch používaných v stavebníctve na ČR. [17]



VI.3 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov vo Fínsku

369 vzoriek fínskych stavebných materiálov bolo testovaných na zistenie koncentrácie ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K . Materiály sú uvedené v tabuľke IV.1. Testovali 266 vzoriek betónu vyrobeného z troch druhov štrku a 42 tehlových vzoriek. Možné bolo použiť len 15 vzoriek z betónového materiálu pretože bolo náročné podrviť materiál a namiešať vzorky v pomere 79:14:7 = štrk: cement: voda. V skúmaných vzorkách betónu bolo obsiahnutých 11 vzoriek cementu z fínskych cementárenských tovární. 23 testovaných vzoriek z tehál bolo z tovární, ktoré pokrývajú skoro 100% produkciu výroby tehál vo Fínsku. Koncentráciu ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K zisťovali pomocou GeLi detektora.

Exhalačná rýchlosť radónu na jednotku plochy materiálu E , je definovaná ako tok radónu uvoľnený z povrchu materiálu. Jednotkou je $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Na určenie exhalačnej rýchlosti zo vzoriek stavených materiálov boli použité dve metódy. Prvou je určenie E z nárastovej krivky radónu uzavretého v nádobe s objemom $0,017\text{ m}^3$. Pričom odber radónu prebiehal na povrchu platne stavebného materiálu. Pri tomto spôsobe odberu je nedostatkom to, že odber prebieha len z jednej strany vzorky a ak je vysoká porozita vzorky, spätný rozptyl spôsobuje prechod radónu z nádoby do materiálu.

Pri druhej metóde použili vzorky veľkosti 15×15, ktoré boli vložené do uzavretej nádoby. V nádobe sa koncentroval radón, ktorý sme postupne odberali a merali jeho koncentráciu pomocou scintilačných komôr.

Z tabuľky vidíme, že exhalácia radónu na jednotku koncentrácie rádia z betónovej platne s hrúbkou 15 cm je $0,38 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1} / \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ zatiaľ čo pri sádre tej istej hrúbky je to len $0,06 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1} / \text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Čo znamená, že exhalačná dávka z betónu je niekoľkonásobne vyššia ako pre iné merané materiály.

V 34 obydlíach ďalej zisťovali ventilačnú rýchlosť a koncentráciu radónu. Ventilačná rýchlosť bola v rozmedzí od 0,27 do 1,99 premien vzduchu za 1 hodinu. Zodpovedajúce hodnoty koncentrácií radónu v obydlíach z rôznych stavebnín sú zobrazené v tabuľke. V normálnych životných podmienkach je ventilačná rýchlosť trochu vyššia. Byty boli vyberané tak, aby radón z pôdy a vody nezapríčinili značný nárast koncentrácie radónu v pobytovom ovzduší. Byty boli umiestnené nad prvým poschodím. Hodnoty, ktoré sme dostali pre exhalačnú dávku celkom súhlasia s hodnotami nameranými v laboratóriu. Exhalačnú dávku pre domy sa nepodarilo určiť, pretože nebolo možné odhadnúť príspevok od radónu difundujúceho z pôdy pod domami. [13]

Tab.VI.4: Koncentrácia rádionuklidov vo fínskych stavebných materiáloch. [13]

Materiál	Číslo vzorky	Rádioaktivita [$\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$]			
		Hodnota	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Štrkový betón	266	max	146,0	225,0	1856,0
		stredná	34,2	39,0	964,0
		min	7,5	9,9	394,0
Betón	15	max	70,3	52,8	960,0
		stredná	53,4	37,6	838,0
		min	36,2	28,4	791,0
Hlinená tehla	38	max	134,0	91,7	1185,0
		stredná	79,8	61,6	986,0
		min	37,1	37,5	780,0
Biela tehla	4	max	25,1	28,8	699,0
		stredná	23,0	21,0	622,0
		min	19,9	14,5	537,0
Drevo	2	max	0,5	1,5	11,7
		stredná	0,4	0,7	9,6
		min	0,3	0,2	7,5
Siporexová rozpínava tvárnica	2	max	52,9	40,3	385,0
		stredná	49,0	35,7	359,0
		min	45,1	31,1	333,0
Cement	11	max	83,7	55,0	336,0
		stredná	40,2	19,9	251,0
		min	14,9	8,5	169,0
Popolček	5	max	129,0	102,0	209,0
		stredná	117,0	78,1	176,0
		min	105,0	32,4	97,2
Sádrové výrobky	17	max	830,0	118,0	30,0
		stredná	306,0	22,5	16,6
		min	24,2	3,4	8,5
Prírodná sádra	1		7,0	1,5	25,0
Izolačná vlna	8	max	31,3	14,0	275,0
		stredná	16,4	7,0	157,0
		min	4,4	2,3	89,5

Tab.VI.5: Exhalačná dávka radónu zo stavebných materiálov s rôznou hrúbkou a koncentrácia ^{226}Ra . [13]

Materiál	Hrúbka [cm]	$C_{^{226}\text{Ra}}$ [Bq.kg ⁻¹]	E [Bq.m ⁻² .h ⁻¹]	E/C ^{226}Ra [Bq.m ⁻² .h ⁻¹]/ [Bq.kg ⁻¹]
Betón:				
Vzorka 1	20	41,6	19,7	0,47
Vzorka 2	20	48,9	21,7	0,44
Vzorka 3	20	60	22,2	0,37
Vzorka 4	18	65,9	27,0	0,41
Vzorka 5	20	59,9	31,5	0,52
Vzorka 6	15	59,9	24,0	0,4
Vzorka 7	10	59,9	15,9	0,27
Vzorka 8	2,5	59,9	1,9	0,03
Vzorka 9	15	63,2	23,2	0,37
Sádra (by product):				
Vzorka 1	6,7	319	13,9	0,04
Vzorka 2	20	482	42,3	0,09
Vzorka 3	15	482	31,2	0,06
Vzorka 4	10	482	20,3	0,04
Vzorka 5	7,5	482	18,6	0,04
Vzorka 6	5	482	10,1	0,02
Vzorka 7	2,5	482	4,7	0,01
Betón (popolčekový agregát):				
Vzorka 1	15	76,4	12,0	0,16
Vzorka 2	15	76,4	11,2	0,15
Vzorka 3	15	76,4	10,0	0,13

Tab.VI.6: Nameraná ventilačná rýchlosť a koncentrácia radónu v pobytovom ovzduší a stredná hodnota exhalačnej rýchlosti na jednotku pobytového objemu a na jednotku plochy materiálu.[13]

Počet izieb	v [h ⁻¹]	C^{222Rn} [Bq.kg ⁻¹]	e [Bq.m ⁻³ .h ⁻¹]	E [Bq.m ⁻² .h ⁻¹]	Vetranie ¹⁾
Skupina betónových bytov					
5	0,60	49,2	27,3	20,5	m
3	0,72	47,7	31,8	23,9	m
3	0,60	23,7	11,9	9,0	m
3	0,74	50,3	34,4	25,9	m
3	0,62	62,5	36,6	27,4	m
3	0,68	77,7	50,3	37,8	m
2	0,66	21,8	12,0	9,0	m
2	1,99	19,8	32,4	24,4	m
4	0,28	48,3	12,7	9,5	m
4	0,67	45,1	27,9	20,9	m
5	0,48	149,0	70,4	52,9	m
2	1,85	61,8	107,0	80,8	m
3	0,50	30,0	13,3	9,9	m
7	0,30	87,7	25,3	19,0	m
4	1,12	17,0	14,9	11,2	m
2	0,83	122,0	97,8	73,5	m
3	0,58	22,7	23,8	17,9	m
3	0,85	63,6	37,1	27,9	m
3	0,50	115,0	55,8	42,0	m
3	0,68	57,5	36,8	27,7	p
3	0,59	54,4	29,9	22,5	p
5	0,27	32,3	7,7	5,7	p
3	0,50	18,0	7,2	5,4	p
Skupina tehových bytov					
2	0,59	32,2	16,9	12,7	p
2	1,03	14,1	10,7	8,1	p
6	0,37	61,9	21,7	16,3	p
4	0,28	33,9	8,4	6,4	p
5	0,51	11,2	3,8	2,9	p
2	0,61	13,7	6,1	4,6	p
2	0,55	22,0	10,1	7,6	p
Betónové domy (osamotené)					
6	0,59	40,3	21,6	-	m
6	0,40	268,0	106,0	-	m
5	0,33	53,7	16,5	-	p
5	0,65	25,3	14,0	-	p

¹⁾ m- mechanické, p- prirodzené

VI.4 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov v Sýrii

Obsah rádionuklidov v materiáloch používaných v cementárskom priemysle ako aj v základných stavebných materiáloch zisťovali aj v Sýrii. Koncentrácia ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K bola meraná gama spektrometriou pomocou HPGe detektora. Všetky vzorky boli mleté na prach, preosievané cez sitko s pletivom 1mm a sušené pri teplote 100°C za 20 hod. Asi 1 kg každej vzorky bol umiestnený do Marinelliho nádoby s objemom 1 l mesiac pred meraním. Výsledky ukázali, že tehla, keramika, pálená tehla a aluminofosfáty majú vyšší stupeň radiácie. Piesok, cement, mramor a vápenec obsahuje menej aktivity. Všetky vzorky okrem aluminofosfátov spĺňali kritériá stanovené OECD. Absorbovaná dávka gama žiarenia

z vnútorného ovzdušia je odhadovaná na $25,2 \text{ nGy.h}^{-1}$, táto hodnota je upravená pre ďalšie vplyvajúce faktory. Prehľad meraní je uvedený v tabuľke. [23]

Tab.VI.7: Koncentrácia rádionuklidov v Bq.kg^{-1} , ekvivalentná dávka v Bq.kg^{-1} stavebných materiálov Sýrie. [14]

Materiál	Číslo vzorky	Rádioaktivita [Bq.kg^{-1}]			Ekvivalentná dávka			
		Hodnota	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
Štrk	3	max	33,0	9,0	140,0	37	25	468
		stredná	18,0	6,0	130,0			
		min	8,0	4,0	114,0			
Íl	7	max	32,0	39,0	357,0	75	53	981
		stredná	29,0	20,0	223,0			
		min	26,0	4,0	48,0			
Sádra	8	max	30,0	6,0	66,0	19	13	249
		stredná	14,0	2,0	31,0			
		min	2,0	0,0	6,0			
Vápenec	9	max	49,0	3,0	35,0	33	23	428
		stredná	29,0	2,0	22,0			
		min	10,0	0,0	5,0			
Popolček	15	max	75,0	15,0	121,0	51	36	678
		stredná	36,0	7,0	64,0			
		min	10,0	4,0	37,0			
Cement	16	max	64,0	64,0	135,0	47	32	601
		stredná	29,0	29,0	80,0			
		min	11,0	11,0	19,0			
Puzolán	7	max	26,0	20,0	474,0	74	52	963
		stredná	20,0	15,0	425,0			
		min	11,0	13,0	344,0			
Piesok	9	max	23,0	5,0	63,0	13	9	165
		stredná	9,0	2,0	21,0			
		min	1,0	0,0	0,0			
Mramor	13	max	146,0	7,0	41,0	20	15	264
		stredná	18,0	1,0	4,0			
		min	0,0	0,0	0,0			
Keramika	2	max	67,0	45,0	323,0	139	97	1806
		stredná	59,0	40,0	292,0			
		min	51,0	35,0	260,0			
Tehla	1		38,0	29,0	331,0	105	74	1370
Pálená tehla	2	max	48,0	47,0	289,0	128	89	1662
		stredná	43,0	45,0	272,0			
		min	38,0	43,0	254,0			
Granulát	8	max	13,0	8,0	63,0	11	8	146
		stredná	7,0	2,0	18,0			
		min	0,0	0,0	0,0			
Antuka	2	max	46,0	32,0	92,0	93	66	1238
		stredná	45,0	32,0	32,0			
		min	45,0	31,0	23,0			
Aluminofosfáty	5	max	442,0	5,0	-	425	298	5926
		stredná	421,0	3,0	-			
		min	392,0	2,0	-			

VI.5 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov v Hong Kongu

O obsah radónu v stavebných materiáloch používaných v krajine sa zaujímali aj vedci v Hong Kongu. Dôvodom bolo nájsť zdroj pomerne vysokej aktivity v pobytovom prostredí. Pri meraní koncentrácie rádia použili GeLi detektora s vysokou rozlišovacou schopnosťou. Pozorovaním nárastovej krivky radónu unikajúceho zo stavebného materiálu, namerali pomocou scintilačných komôr exhaláciu rýchlosť radónu. Výsledky meraní sú uvedené v tabuľke VI.8. [15]

Tab.VI.8: Koncentrácia ^{226}Ra , exhalačná rýchlosť a emanačný koeficient surovín používaných na výrobu stavebných materiálov. [15]

Materiál	Číslo vzorky	Hodnota	Koncentrácia ^{226}Ra [Bq.kg ⁻¹]	Exhalačná rýchlosť [x10 ⁻⁶ Bq.kg ⁻¹ .s ⁻¹]	Emanačný koeficient %
Cement	3	max	45,0	1,7	2,1
		stred	42,6	1,5	2,0
		min	38,0	1,3	1,8
10 mm vzorky	3	max	232,0	21,3	5,5
		stred	225,5	20,2	5,2
		min	218,0	18,6	1,9
20 mm vzorky	3	max	241,0	19,6	5,0
		stred	231,9	18,4	4,7
		min	216,0	16,7	4,3
Piesok	3	max	19,0	4,6	12,5
		stred	17,3	4,1	12,0
		min	16,0	3,8	11,6
Popolček	3	max	105,0	7,2	4,4
		stred	102,0	6,8	4,1
		min	99,0	6,1	3,6

VI.6 Meranie rádioaktivity stavebných materiálov v Maďarsku

Uhlie ťažené v jednom z maďarských regiónov, Transdanubiane, obsahuje veľkú koncentráciu ^{226}Ra . Spracovaním tohto uhlia na škváru sa obsah rádionuklidov zvyšuje. Keďže sa škvára používa ako stavebný alebo izolačný materiál v stavebníctve, bola preskúmaná radiačná situácia v tejto oblasti a možný dopad na obyvateľstvo. V práci [25] je prehľad vyšetrených bytov z troch miest s uhoľnou baňou a elektrárnou. Materiály boli potriedené do kategórií podľa medzinárodných štandardov a odporúčaní v závislosti od nameraného obsahu rádionuklidov. Pri meraní aktivity škváry bolo použitých 35-40 z každého mesta. Vzorky boli vysušené a uložené do Marinelliho nádoby s objemom 0,6 l pokiaľ sa nedosiahla rádioaktívna rovnováha medzi ^{226}Ra a jeho produktmi premeny. Na meranie koncentrácie prírodných rádionuklidov použili HPGe detektor.

Tab.VI.9: Koncentrácia rádionuklidov a index hmotnostnej aktivity škváry v stavebných materiáloch z troch maďarských miest. $(I = \frac{a_{Ra}}{300} + \frac{a_{Th}}{200} + \frac{a_K}{3000})$. [16]

Mesto	Rádioaktivita [$Bq \cdot kg^{-1}$]				Index hmotnostnej aktivity (I)
	Hodnota	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Ajka	max	2893	81	386	9,93
	stredná	1920	41	198	5,96
	min	578	16	45	2,45
Tatabánya	max	2407	119	468	3,21
	stredná	1912	83	352	5,37
	min	843	50	257	5,37
Várpalota	max	523	48	333	2,08
	stredná	298	40	273	1,35
	min	160	37	227	0,80

VI.7 Rádioaktivita stavebných materiálov v niektorých krajinách sveta

Podobné merania a analýzy prebiehali aj v ďalších štátoch. Výsledky z týchto meraní sú v súhrnnej tabuľke VI.

Tab.VI.10: Stredná ekvivalentná dávka stavebných materiálov používaných v Sýrii a v ďalších krajinách v $Bq \cdot kg^{-1}$. [23]

Krajina	Aluminofosfát	Sadra	Mramor	Štrk	Piesok	Vápenec	Tehla	Cement	Hlina
Japonsko	-	-	-	-	-	-	-	52	-
Čína	-	-	-	-	-	-	-	60	-
Austrália	474	15	-	115	70	15	-	115	322
Fínsko	-	11	-	-	178	-	-	100	-
Nemecko	622	41	-	315	118	48	207	123	-
Nórsko	-	15	-	-	-	-	274	74	-
Veľká Británia	659	44	-	289	19	-	-	59	-
býv. ZSSR	-	-	-	463	70	-	167	126	-
Švédsko	107	7	-	-	-	-	352	153	-
Španielsko	-	-	-	307	59	-	211	137	-
Sýria	425	19	20	36	13	32	105	46	75
Malajzia	-	16	-	651	152	95	614	181	-
Bangladéš	-	100	192	-	592	212	210	348	-
Rakúsko	-	67	12	89	-	16	151	63	-
Jamajka	-	96	-	-	-	-	169	83	-
India	-	443	-	-	3629	24	-	88	874

Záver:

Moja práca v rámci vedeckej odbornej činnosti má charakter rešerše. Venovala som sa v nej súčasným poznatkom súvisiacich s pôvodom radónu, jeho uvoľňovaním z materských hornín a následným cestám, ktorými sa dostáva do obydlií obyvateľstva. V prvom celku som podrobnejšie popísala práve exhaláciu radónu zo stavebných materiálov a metódy merania exhalačnej rýchlosti.

V druhej časti som vyhodnotila údaje namerané na katedre jadrovej fyziky FMFI UK a dáta sú zaznamenané v práci K. Holého a J. Fejdu [10]. Z obrázku VI.1. vidíme, že najvyššou exhalačnou rýchlosťou sa vyznačuje pórobetón. Ďalej z porovnania betónových vzoriek v obrázku VI.2. vyplýva, že vrstva omietky znižuje exhalačnú rýchlosť ^{222}Rn . Urobila som prehľad platnej legislatívy na Slovenku a v Českej republike vyplývajúcej z medzinárodných požiadaviek a štandardov.

Z meraní vo Fínsku je zjavné, že najvyšší obsah rádia majú sádrové výrobky (by product). Z výsledkov meraní exhalačnej rýchlosti vzoriek rovnakých rozmerov je zrejmé, že exhalácia radónu na jednotku koncentrácie rádia z betónovej platne je niekoľkonásobne vyššia ako zo sádrovej platne tých istých rozmerov. Čo znamená, že exhalačná dávka z betónu je niekoľkonásobne vyššia ako pre iné merané materiály. Z porovnania uvedeného v tabuľke VI.6. vidíme, že koncentrácia radónu je značne vyššia v bytoch postavených z betónu ako v tehlových bytoch. Zatiaľ čo hodnoty namerané v betónových domoch a betónových bytoch sú porovnateľné.

Z výsledkov meraní rádioaktivity stavebných materiálov v Sýrii uvedených v tabuľke VI.7. majú značne zvýšený obsah rádia aluminofosfáty. Rádioaktivita ostatných materiálov sa nevymyká priemerným hodnotám. Z meraní cementu s rôznymi hrúbkami vieme, že exhalačná rýchlosť vzorky s menšou hrúbkou je nepatrne vyššia.

Za povšimnutie stoja údaje v tabuľke VI.10 a to vysoká aktivita piesku v Indii, tehly i štrku v Malajzii.

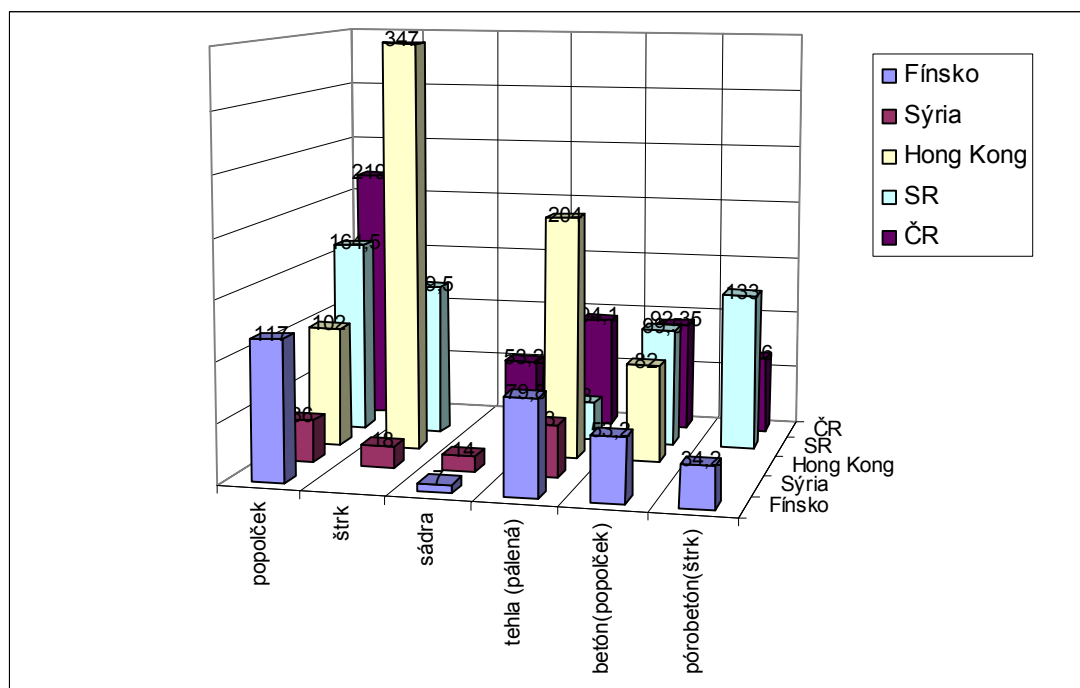
V tabuľke Z.1. vidíme porovnanie aktivity tehly a betónu z rôznych krajín. Najvyššou aktivitou sa vyznačujú stavebné materiály v Hong Kongu. Vo všetkých krajinách však prevyšuje aktivita betónu.

Z grafov a tabuliek uvedených v mojej práci je zrejmé, v ktorých krajinách a ktoré materiály majú zvýšený obsah rádionuklidov a z toho vidíme ako prispievajú k radiačnej záťaži obyvateľstva.

Tab.Z.1: V tabuľke je porovnanie koncentrácie ^{226}Ra , radónovej exhalácie a emanačného koeficientu betónu a tehál používaných v Hong Kongu a ďalších krajinách.[24]

Krajina	Tehly			Betón		
	$C_{226\text{Ra}}$ [Bq.kg ⁻¹]	$E \times 10^{-6}$ [Bq.kg ⁻¹ .s ⁻¹]	k_e %	$C_{226\text{Ra}}$ [Bq.kg ⁻¹]	$E \times 10^{-6}$ [Bq.kg ⁻¹ .s ⁻¹]	k_e %
Hong Kong	131	13,0	5,3	82	3,2	3,6
Nórsko	28	5,9	1,2	63	1,3	1,0
Maďarsko	13	7,8	28,0	18	0,9	2,3
Veľká Británia	18	1,4	3,8	65	0,6	0,5
USA	15	7,4	21,1	45	1,0	1,0
Grécko	11-12	2,9-5,0	2-3	45	0,3-0,5	2,0

Obr.Z.1: Obrázok ilustruje porovnanie aktivity stavebnín v rôznych krajinách.



Použitá literatúra:

- [1] Müllerová M.: Komplexná radónová diagnostika uzavretých priestorov. Diplomová práca, FMFI UK, Bratislava (2005)
- [2] Stanys T.: Vývoj vysokocitlivých detekčných systémov radónu a testovanie modelov jeho správania sa v životnom prostredí. Projekt dizertačnej práce, FMFI UK, Bratislava (2000)
- [3] Holý K.: Investigations of ^{14}C and ^{222}Rn variations in atmosphere and soil in Slovakia
- [4] Szépvová H.: Štúdium emanačných koeficientov a exhalačných vlastností ^{222}Rn z pôdy. Diplomová práca, FMFI UK, Bratislava (2001)
- [5] UNSCEAR- Report 1988: Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation. United Nation, New York (1988)
- [6] Vičanová M.: Využitie detektorov stôp v pevnej fáze pri riešení radónovej problematiky. Dizertačná práca, FMFI UK, Bratislava (2003)
- [7] Holý K. a kol.: Radionuclide content in some building materials and their radon exhalation. Elsevier Science S.A., Lausanne and Akadémiai Kiadó, Budapest (1994)
- [8] Böhm R.: Modelovanie radiačného rizika indukovaného radónu a zdrojmi Augerových elektrónov. Dizertačná práca, FMFI UK, Bratislava (2003)
- [9] Komínek A.: Přírodní radioaktivita ve stavebnictví – výzkum a optimalizace životních podmínek obytných objektu. Výzkumný ústav stavebních hmot v Brně, Brno (1988)
- [10] Fejda J.: Vyhodnotenie súboru vzoriek, stavebných materiálov používaných pri zatepľovaní vzhľadom na ich mernú aktivitu radónu – Exhalačné rýchlosti ^{222}Rn a rádioaktivita stavebných materiálov. FMFI UK, Bratislava (1992)
- [11] Bosá I.: ^{14}C a ^{222}Rn v prírodných médiách a ich využitie pre štúdium transportu ďalších plynov. Písomná práca k dizertačnej skúške, FMFI UK, Bratislava (2001)
- [19] Nazaroff W.W.: Radon and its decay products in indoor air. Wiley-Interscience, New York (1988)
- [11] Mustonen R.: Natural radioactivity in and radon exhalation from finnish building materials. Health Physics Vol. 46, No 6, pp.1195-1203, USA (1984)
- [12] Othman I.: Radionuclide content in some building materials in Syria and their indoor gamma dose rate. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 55, No. 4, pp. 299-304, Nuklear Technology Publishing (1994)

- [13] Man C.K.: Radioactivity contents in building materials used in Hong Kong. Journal of radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 232, Nos. 1-2, pp. 219/222, Akadémiai Kiadó, Budapest (1998)
- [14] Somlai J.: Radiation dose from coal slag used as building material in the Transdanubian region of Hungary. Radiation Protection Dosimetry, Vol. 118, No.1, pp. 82-87 (2005)
- [15] http://www.suro.cz/cz/prirodnioz/stavebnimaterialy/document_view
- [16] Holý a kol.: Testiny of the ^{222}Rn as a Tool for Determination of CO_2 Exhalation Rates from the Soil, Zborník 2. Banskoštiavnické dni, Banská Štiavnica 6. – 7. 10. 2000
- [17] Holý a kol.: Radionuklide content in building materials, J. radionanal. Nucl. Chem., Letters 199 (4) 251 – 264 (1995)