

**Univerzita Karlova v Praze  
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie  
Studijní obor: Hospodaření s přírodními zdroji



**Pavla Kocíková**

Radioaktivita stavebních materiálů  
Radioactivity of building materials

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce/Školitel: Mgr. Viktor Goliáš, Ph.D.

Praha, 2011

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 16. 8. 2011

Podpis:

## ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou radioaktivity stavebních materiálů. V úvodu pojednává o postoji k radioaktivitě z obecného i legislativního hlediska a o jejím původu a rozdělení. Zmiňuje stručně jednotky aktivity. Dále se zabývá problematikou radioaktivity ve stavebních materiálech samotných, problematikou vznikajícího radonu a emanací stavebních materiálů. Druhá polovina práce je věnována extrémním případům využití nevhodných stavebních surovin ve stavebnictví v historii České republiky, a to konkrétně: domům v Jáchymově, pórobetonu vyráběného v Poříčí u Trutnova a montovaným domům START. Závěrečná část je věnována systému hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech dle platné legislativy a stručně popisuje postup výrobců a dovozců stavebních materiálů při překročení limitních hodnot.

## SUMMARY

The work examines the issue of radioactivity of construction materials. The introduction deals with the approach to radioactivity from the general and legislative points of view and its origin and division. It briefly mentions units of activity. It further deals with the issue of radioactivity in construction materials as such, the issue of emerging radon and emanation of construction materials. The second part of the work focuses on extreme cases of use of unsuitable construction raw materials in the building industry in the history of the Czech Republic, specifically houses in Jáchymov, aerated concrete produced in Poříčí near Trutnov and prefabricated houses START. The closing part deals with the system of evaluation of natural radionuclide content in construction materials under the applicable legislation and it briefly describes the procedure of manufacturers and importers of construction materials in case of exceeding limit values.

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému školiteli Mgr. Viktoru Goliášovi, Ph.D. za spolupráci při tvorbě této práce.

## OBSAH:

1. ÚVOD	1
1.1 Radioaktivita a její regulace	1
1.2 Přirozená radioaktivita	2
1.3 Jednotky hmotnostní a objemové aktivity	4
1.4 Přírodní radioaktivní prvky ve stavebních materiálech	4
1.5 Produkce radonu obecně	5
1.6 Emanace stavebních materiálů	7
2. TYPY STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ	8
2.1 Obsahy radioaktivních prvků v typických případech	8
3. EXTRÉMNÍ PŘÍPADY NEVHODNÝCH SUROVIN VE STAVEBNICTVÍ	9
3.1 Domy v Jáchymově	9
3.2 Pórobeton z Poříčí u Trutnova	10
3.3 Domy START	11
4. SYSTÉM HODNOCENÍ PODLE PLATNÉ LEGISLATIVY	12
4.1 Limity, postup při překročení	12
5. DISKUZE	15
6. ZÁVĚR	17
7. LITERATURA	18

## 1. ÚVOD

Radioaktivita, v poslední době stále skloňovanější pojem, vyvolává v lidech neustálé otázky, jak ji potlačit a izolovat se tak od ionizujícího záření. Problémem však stále zůstává nedostatečná informovanost lidí, a to zejména o zdrojích radioaktivity. Obavy lidstva jsou stále zaměřovány na umělé zdroje radioaktivity a málo kdo si uvědomuje, že radioaktivita zde byla již od samého počátku naší existence a bude zde i nadále, a to zejména ve formě radioaktivity přirozené.

Obecně lze říci, že pokud nazveme něco jako radioaktivní nebo jako zdroj ionizujícího záření, nastanou z dané věci obavy někdy až nepřiměřené. Je tedy nutné zdroje ionizujícího záření, ať už přirozené nebo umělé, vyhodnocovat na základě míry ozáření a nelze všechny zdroje radioaktivního záření považovat za nebezpečné a přistupovat k nim jako k něčemu, co je potřebné z našeho prostředí definitivně odstranit, protože i přes všechny naše snahy je to úkol nereálný. Radioaktivita se ve formě tzv. přirozeného pozadí vyskytuje všude kolem nás a je v podstatné míře produkována právě přirozenými zdroji ionizujícího záření.

Cílem této práce je tak poskytnout základní informace o jednom ze zdrojů ionizujícího záření, který se podílí na radiační zátěži, a to konkrétně na radiační zátěži v budovách a tím přispívá k celkovému ozáření obyvatelstva způsobeného přírodními zdroji. Dále poukázat na extrémní případy využívání nevhodných surovin ve stavebnictví z hlediska radiační ochrany.

### 1.1 Radioaktivita a její regulace

Obecně lze radioaktivitu rozdělit na přirozenou a na radioaktivitu pocházející z umělých zdrojů. Nutno podotknout, že v zájmu veřejnosti je zejména radioaktivita z umělých zdrojů a málokdy se setkáváme mezi laickou veřejností se znalostí přirozeného radiačního pozadí a radioaktivity pocházející z přírodních zdrojů a zejména pak z hornin, které se běžně objevují v našem denním životě, například ve formě stavebních surovin. Specifikem zůstává ohrožení životního prostředí vlivem radioizotopů radonu, které jsou však až produktem rozpadu radia, thoria a uranu, prvků běžně se vyskytujících v horninovém podloží a stavebních materiálech.

Regulace radioaktivity je v právním řádu České republiky obecně vymezena zákonem č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a zdrojů ionizujícího záření, ve znění pozdějších předpisů (dále jen „atomový zákon“). Národní legislativa v oblasti radiační ochrany (stejně tak jako legislativa evropská a další mezinárodní zdroje) vycházejí z doporučení Mezinárodní komise radiologické ochrany ICRP (angl. „*International Commission on Radiological Protection*“).

Atomový zákon obecně upravuje požadavky, které souvisejí s využíváním jaderné energie k mírovým účelům. Obsahuje tak zejména úpravu práv a povinností fyzických a právnických osob k využití jaderné energie, podmínky k nakládání radioaktivními odpady, dále pak působnost státního dozoru nad jadernou bezpečností a podmínky jaderné bezpečnosti.

Lze například uvést, že mezi jednu z povinností stanovenou atomovým zákonem výrobcům a dovozcům stavebních materiálů patří dle ustanovení § 6 odst. 6 povinnost zajistit systematické měření hodnocení obsahu přírodních radionuklidů a v rozsahu stanoveném prováděcím právním předpisem vést o výsledcích evidenci a oznamovat tyto údaje Státnímu úřadu pro jadernou bezpečnost (dále jen „SÚJB“). V podrobnostech je atomový zákon proveden vyhláškou č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění pozdějších předpisů. V této souvislosti lze také podotknout, že měření obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech je dle ustanovení § 9 odst. 1 písm. r) atomového zákona, řazeno mezi služby významné z hlediska radiační ochrany, k jejichž provádění je nezbytný souhlas SÚJB.

## 1.2 Přírozená radioaktivita

Po celou dobu naší existence jsme vystaveni malým dávkám ionizujícího záření z přírodních radionuklidů a kosmického záření, od konce 19. století přistoupil k těmto vlivům vliv radioaktivity z umělých zdrojů. Radioaktivitu, jak již bylo řečeno, dělíme na přirozenou a umělou, stejně tak dělíme radioaktivní prvky na přirozeně a uměle radioaktivní. Přirozeně radioaktivní prvky se vyskytují v přírodě a jejich radioaktivita je samovolná, nevyvolaná vnějším umělým zásahem (Hála 1998).

Radioaktivita ve své podstatě znamená schopnost nuklidů měnit se v nuklidy jiné, odchylných vlastností a vysílat při této přeměně charakteristické záření, které lze podle charakteru a intenzity rozdělit na záření  $\alpha$  (alfa),  $\beta$  (beta),  $\gamma$  (gama) a neutronové záření.

### Záření alfa

Při přeměně alfa se v atomovém jádře zmenší počet nukleonů o čtyři, z toho počet protonů o dva. (Šáro a Tölgyessy 1985). Záření  $\alpha$  je tedy proud jader helia ( $\alpha$ -částic), nese kladný elektrický náboj a má nejkratší dosah.

### Záření beta

Beta přeměna je přeměna nukleonu z protonového stavu do stavu neutronového nebo obráceně, přeměna z neutronového stavu do stavu protonového (Šáro a Tölgyessy 1985). Jedná se o nejčastější formu přeměny nuklidů. Rozlišujeme záření  $\beta^-$  (elektrony) a  $\beta^+$  (kladně nabitě pozitrony).

### Záření gama

Záření  $\gamma$  je elektromagnetické záření vysoké frekvence. Nemá elektrický náboj.

### Neutronové záření

Jedná se o proud neutronů, který stejně jako záření  $\gamma$  nemá elektrický náboj.

Samotné zdroje přírodní radioaktivity lze dále rozdělit do dvou skupin, a to na kosmické záření a přírodní radionuklidy.

### Kosmické záření

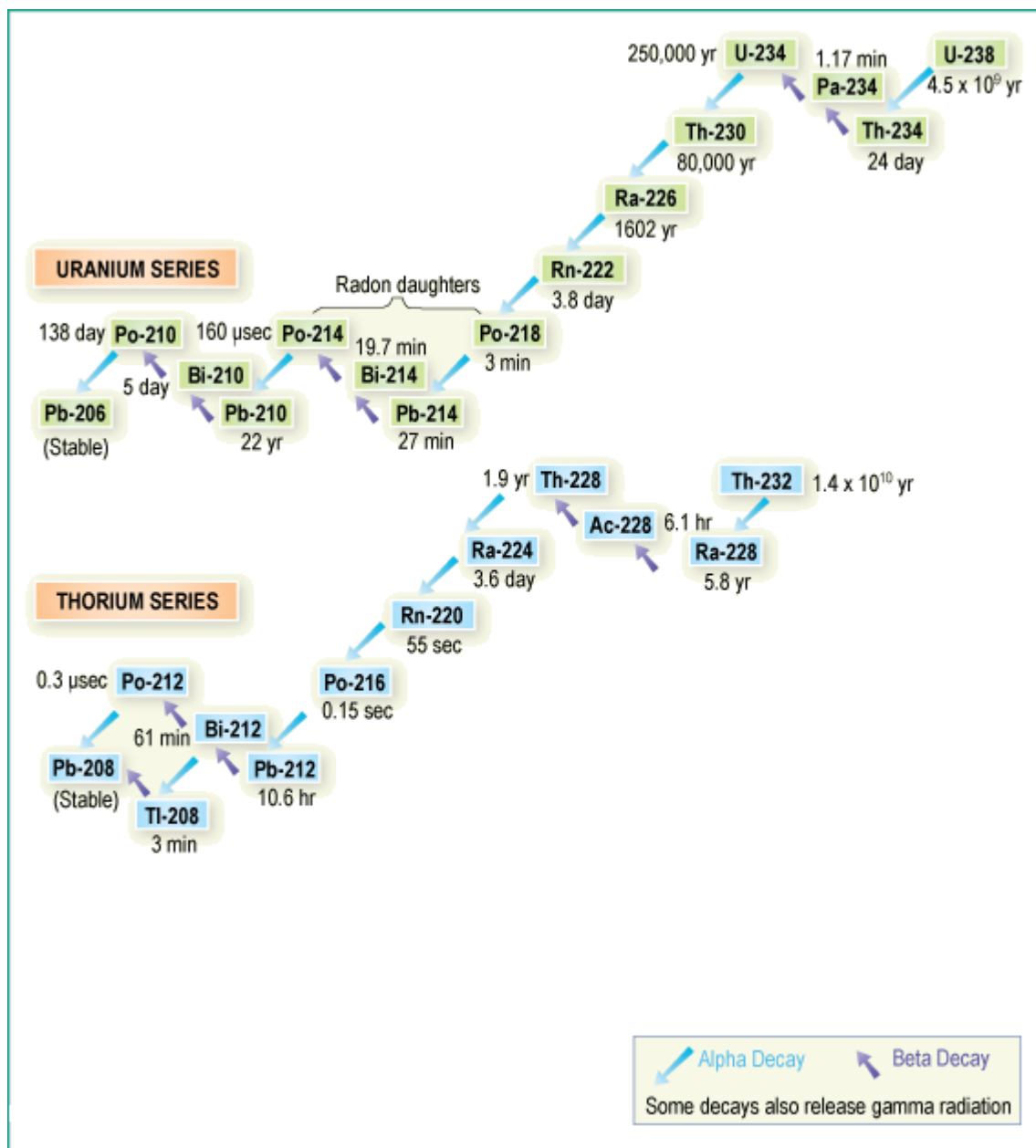
Kosmické záření je specifickým typem radioaktivního vysokoenergetického záření vstupujícího do zemské atmosféry z vnějšího prostoru vesmíru. Hustota toku částic kosmického záření je závislá zejména na nadmořské výšce a vlivu zemského magnetického pole.

### Přírodní radionuklidy

Přírodní radionuklidy dále dělíme podle původu na:

- (a) kosmogenní radionuklidy vznikající jadernými reakcemi při interakci kosmického záření se stabilními prvky zejména ve vnějším obalu Země (např. izotop  $^{14}\text{C}$  reakcí  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ , dalšími jsou např.  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$  aj);
- (b) původní primordiální radionuklidy, které vznikly v raných stádiích vesmíru a díky velmi dlouhému poločasu rozpadu ( $>10^8$  roků) se dosud vyskytují na Zemi ve významném množství (např.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$  aj.). Rozpadové řady zájmových radionuklidů naleznete v obr. 1. Řada dalších původně přítomných radionuklidů kvůli kratšímu poločasu již vymřela nebo je prakticky nedetekovatelná; a
- (c) radionuklidy vznikající sekundárně z původních radionuklidů tvořících rozpadové řady. Ze čtyř možných rozpadových řad: uran-radiové (vychází od  $^{238}\text{U}$ ), thoriové (od  $^{232}\text{Th}$ ), aktiniové (od  $^{235}\text{U}$ ) a neptuniové (od  $^{237}\text{Np}$ ) se v přírodě setkáme pouze s prvními třemi.

Poslední dvě skupiny přírodních radionuklidů jsou "pozemského" původu, a proto se označují jako terestrální (Principy a praxe radiační ochrany 2000, SÚRO).



Obr. 1. Rozpadové řady primordiálních radionuklidů  $^{238}\text{U}$  a  $^{232}\text{Th}$  s poločasů jejich rozpadu. (<http://www.world-nuclear.org>) 08. 08. 2011

### 1.3 Jednotky hmotnostní a objemové aktivity

Pro stanovení radioaktivity materiálů se používá veličiny aktivity, která je udávána v jednotkách becquerel (Bq). Jednotka byla pojmenována po francouzském fyzikovi Henri Becquerelovi (1852 - 1908), který v roce 1903 obdržel spolu s manželi Curieovými Nobelovu cenu za fyziku za výzkumy v oblasti radioaktivity. Radioaktivitu Becquerel objevil v roce 1896 díky změnám na fotografické desce, která předtím přišla do styku s uranovými solemi.

Aktivita udává počet jaderných přeměn, které se uskuteční v určitém množství látky za jednotku času. Jednotkou aktivity je reciproká sekunda a pro tento případ se jí dostalo názvu becquerel. Zjednodušeně tedy charakterizuje intenzitu radioaktivního záření. Čím větší je radioaktivita dané látky v Bq, tím více jader se přemění za sekundu, což znamená intenzivnější záření. Veličina aktivity se vztahuje k zářiči jako k celku, nezávisle na jeho tvaru, rozměrech nebo hmotnosti. V řadě případů je užitečné vyjádřit i rozložení aktivity ve zdroji, tj. aktivitu na jednotkovou hmotnost, objem atp. Tak je možné definovat hmotnostní aktivitu diferenciální formou jako podíl aktivity a celkové hmotnosti látky. Jednotkou v soustavě SI je pak Bq/kg. Současně lze definovat i objemovou aktivitu diferenciální formou, a to jako podíl aktivity a celkového objemu radioaktivní látky. Jednotkou v soustavě SI je pak Bq/m<sup>3</sup>.

V textu se dále setkáme s veličinou objemová aktivita radonu (OAR), která je jednou ze základních veličin používaných pro měření a hodnocení obsahu radonu a jeho produktů přeměny ve vzduchu. Pro objemovou aktivitu radonu (OAR) se používá jednotka Bq/m<sup>3</sup>.

### 1.4 Přírodní radioaktivní prvky ve stavebních materiálech

Na úvod je třeba zmínit, že ve své podstatě všechny stavební materiály, ať už se jedná o kamenivo, cihly, beton, maltu, cement, vápno nebo sádku, obsahují přírodní radionuklidy. Původ přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech je zapříčiněn zvýšeným obsahem níže uvedených (1.4.1) nebo mateřských radioaktivních prvků v horninách, ze kterých jsou stavební materiály produkovány.

V případě problematiky radioaktivity stavebních materiálů se tedy zabýváme hodnocením obsahu přirozeně se vyskytujících terestrálních radionuklidů v daném materiálu, a to konkrétních prvků <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Th a <sup>40</sup>K.

Hlavními zdroji jaderného záření v horninách jsou draslík, uran a thorium. Izotopy <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>232</sup>Th jsou mateřskými prvky rozpadových řad, jejichž členové jsou nestabilní a jsou tak zdrojem jaderného záření. Mezi členy rozpadových řad patří tedy z výše zmíněných <sup>226</sup>Ra a <sup>228</sup>Th, přičemž <sup>40</sup>K není produktem rozpadových řad.

1.4.1 Radium 226 (<sup>226</sup>Ra) je nejvýznamnějším izotopem radia, které je produktem rozpadové řady uranu i thoria. Poločas rozpadu <sup>226</sup>Ra je 1602 let. <sup>226</sup>Ra je takzvaným prekurzorem radonu, který vzniká jako jeho rozpadový produkt.

Thorium 228 (<sup>228</sup>Th) je produktem thoriové rozpadové řady a jeho poločas rozpadu je 1,9116 roku. Jedná se, stejně jako u velké většiny dalších izotopů thoria, o  $\alpha$ -zářič. V literatuře se při hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech lze setkat s hmotnostními aktivitami jeho mateřského prvku <sup>232</sup>Th. Důvodem je skutečnost, že mezi dceřiným <sup>228</sup>Th a mateřským <sup>232</sup>Th dochází k radioaktivní rovnováze, která je způsobena krátkým poločasem <sup>228</sup>Th (viz obr. 1).

Draslík 40 (<sup>40</sup>K) je mezi třemi izotopy draslíku jediný radioaktivní. Draslík je velmi rozšířený prvek litosféry. Draslík je obecně mobilní a za různých teplotně tlakových podmínek může obohacovat horniny (Matolín 1970).



Pro ilustraci lze uvést, že průměrná koncentrace draslíku, uranu a thoria v horninách zemské kůry je 2,5% K, 2 - 3 ppm U a 8 - 12 ppm Th (Kukal a Reichmann 2000).

S ohledem na skutečnost, že Česká republika (a její předchůdkyně) již od devadesátých let minulého století legislativně vymezuje stanovování obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech, je dále možné určit průměrné hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů v typických materiálech používaných ve stavebnictví, jak ukazuje tabulka 1. Důvodem pro uvedený postup je požadavek, aby při výrobě stavebního materiálu nedocházelo k použití nevhodných vstupních surovin.

Tabulka 1. Průměrné hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech v České republice. (Principy a praxe radiační ochrany 2000, SÚRO)

Stavební materiál	Průměrné hmotnostní aktivity (Bq/kg)		
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
Beton	34	25	490
Cihla	49	52	670
Pórobeton z popílku	45	54	460
Škvárobeton	30	44	270

Výskyt přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech vede k tomu, že lidé bydlící v domech jsou ozáření ionizujícím zářením pocházejícím ze stavebních materiálů, a to buď přímo pronikavým zářením elektromagnetickým (zářením gama) nebo nepřímo vdechnutím produktů přeměny radonu exhalovaného stavebními materiály (Thomas 2002).

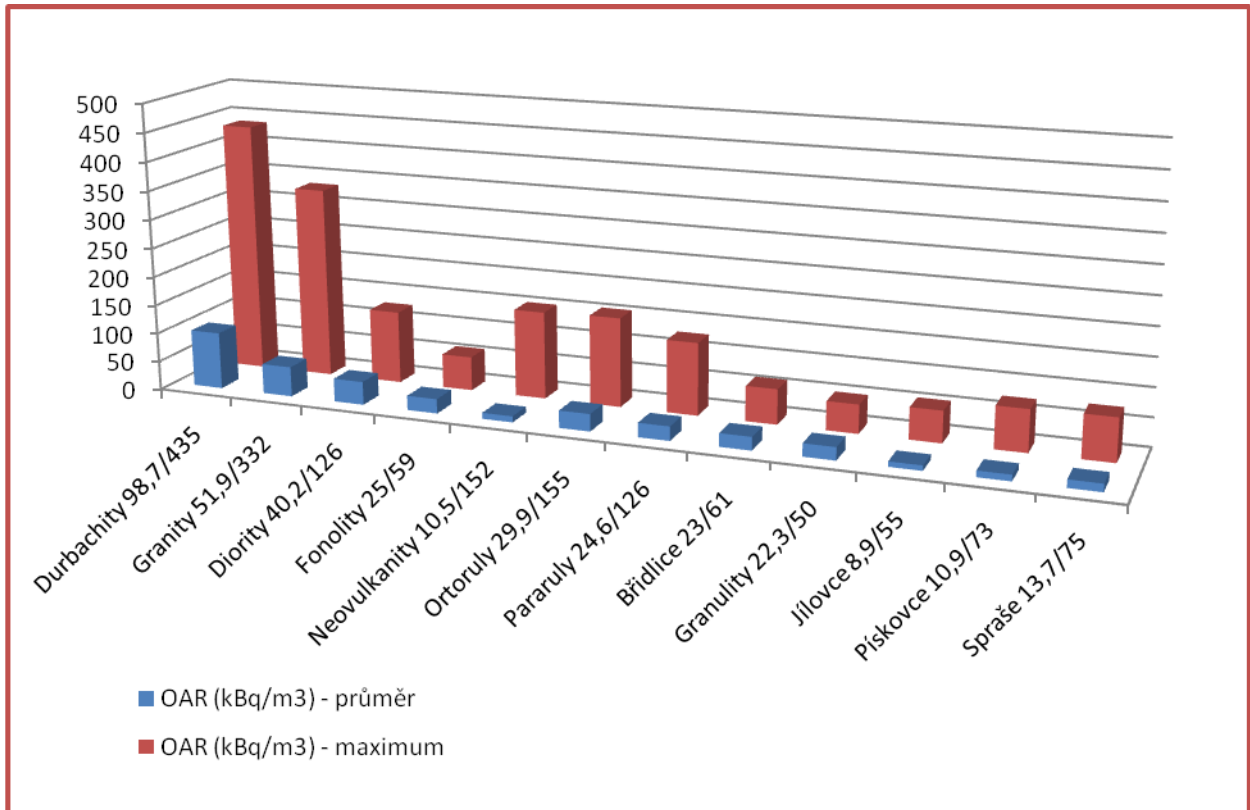
### 1.5 Produkce radonu obecně

Radon doprovází člověka po celou dobu jeho života a na celkovém ozáření lidského organismu se podílí 55 % (Pytlík 1997). Radon je plyn bez chuti a zápachu, je chemicky inertní. Vzniká jako produkt radioaktivního rozpadu <sup>226</sup>Ra (vznikající rozpadem <sup>238</sup>U) a díky své nestálosti postupně zaniká dalším radioaktivním rozpadem. Například izotop <sup>222</sup>Rn má poločas rozpadu 3,825 dne (Pytlík 1997). V současné době je známo přibližně dvacet nestabilních izotopů radonu.

Česká republika patří k zemím s nejvyšší koncentrací radonu v interiéru s průměrnou hodnotou 140 Bq/m<sup>3</sup> (Hůlka a kol. 2008). Dominantním zdrojem radonu ve stavbách je horninové podloží stavby (viz. průměrné a maximální hodnoty na obr. 2), ze kterého je radon nasáván spolu s půdním vzduchem nebo se může šířit difuzí. Velmi důležitým faktorem, který ovlivňuje koncentraci radonu v půdním vzduchu je radioaktivita mateřské horniny (aktivita <sup>226</sup>Ra).

Obecně lze říci, že největší radioaktivitu vykazují vyvřelé horniny, menší horniny metamorfované a nejmenší sedimenty, vše však záleží na konkrétní geochemii hornin a i mezi sedimenty lze najít horniny vysoce radioaktivní (Jiránek a Pospíšil 1993). K dalším zdrojům patří dále použitý stavební materiál a podzemní voda díky schopnosti radonu rozpustit se ve vodě.

Vzhledem k tomu, že horninové podloží České republiky je z velké části tvořeno vyvřelými a metamorfovanými horninami, je zřejmé, že podíl přírodní radioaktivity z geologického podloží hraje významnou roli v celkovém ozáření organismu. Pro ilustraci jsou na obr. 3 znázorněny přístupové cesty radonu do domů.



Obr. 2. Objemové aktivity radonu v půdním pokryvu nad jednotlivými typy hornin Českého masivu. (obsah podle: <http://radon-servis.cz/1-co-je-to-radon.htm>) 10. 08. 2011

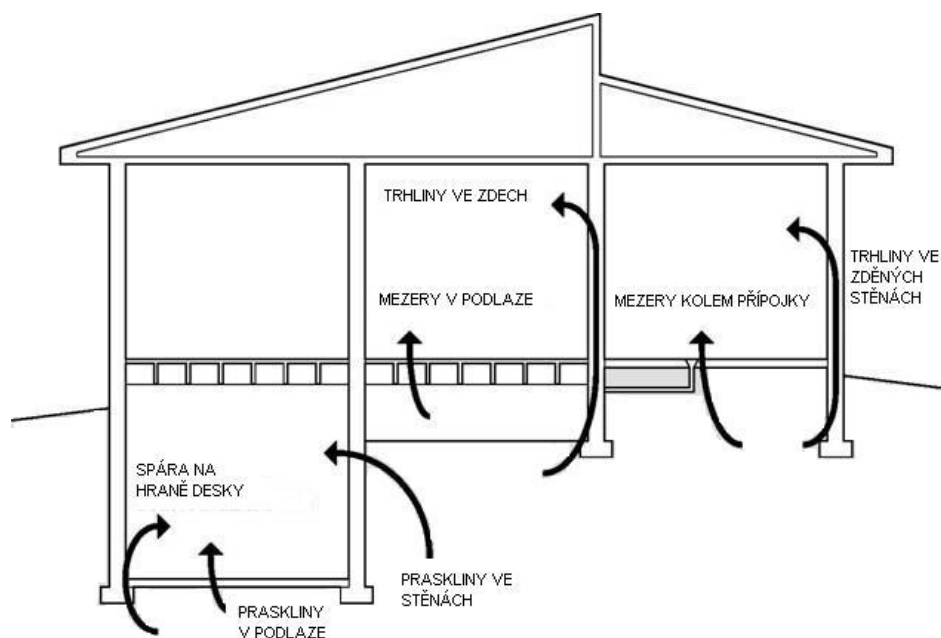
## 1.6 Emanace stavebních materiálů

Emanace radonu ze stavebních materiálů je zapříčiněna zvýšeným obsahem  $^{226}\text{Ra}$ . Emanací nazýváme proces, kdy se z minerálů mateřské horniny obsahující  $^{226}\text{Ra}$  uvolňují atomy radonu (Jiránek a Pospíšil 1993). Tento proces zahrnuje fázi radioaktivního rozpadu mateřského izotopu v minerálu, fázi migrace atomů Rn po krystalické mřížce minerálu k jeho povrchu, popřípadě k defektům a konečně přechod atomů Rn do pórů, defektů a trhlin (Jiránek a Pospíšil 1993). Vzhledem k tomu, že při výrobě stavebního materiálu dochází k přepracování původní horniny (např. drcením kameniva), může být emanace radonu ještě zvýšena jeho uvolňováním z povrchu drcených zrn.

Ke zhoršení radiační zátěže dochází obvykle tam, kde jsou používány sádrové stavební prvky z fosfosádrovce, pórobetonové nebo škvárobetonové prvky, betony používající kameniva z kyselých vyvělin či hlušin rudných dolů (Jiránek a Pospíšil 1993).

Vzhledem k tomu, že koncentrace radonu ve vnitřním prostředí budov se mohou pohybovat ve velmi širokém rozpětí, a to od velmi nízkých až po velmi vysoké srovnatelné s koncentracemi radonu v zemské kůře, je ve světě trendem snaha o zmírnění koncentrací radonu v budovách, a to zejména s ohledem na zdravotní následky, které jsou s vysokými koncentracemi radonu spojovány.

V současné době se považuje za prokázané, že ozáření z radonu a produktů jeho přeměn je jednou z nejdůležitějších příčin vzniku rakoviny plic, jak vyplývá ze studií provedených v řadě oblastí, například v Americe (Krewski 2006, 2005), ale i v Evropě (Darby 2004, 2006) a Číně (Lubin 2004). V České republice je v oblasti radonové problematiky a ochrany určující takzvaný „Radonový program ČR 2010 až 2019 – Akční plán“, který navazuje na výsledky „Radonového programu ČR schválený na období let 2000 až 2009“. Akční plán je zpracován v souladu se současnou právní úpravou České republiky v oblasti radiační ochrany a zohledňuje i aktuální trendy v členských státech Evropské unie.



Obr 3. Přístupové cesty radonu do objektů. (<http://www.ornl.gov/sci/buildingsfoundations/handbook/section1-4.shtml>) 15. 08. 2011

## 2. TYPY STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

### 2.1 Obsahy radioaktivních prvků v typických případech

Jako typické stavební materiály obsahující zvýšený obsah přírodních radionuklidů nelze považovat jen materiály, které jsou vyráběny například z přírodního kameniva nebo pálené hlíny, ale v posledních letech roste tendence v evropských a dalších zemích používat ve stavebnictví i velké množství vedlejších produktů z jiných odvětví a tyto rezidua používat při výrobě stavebních materiálů, například popílky po spalování uhlí nebo strusky z hutní výroby a fosfosádrovec, který je vedlejším produktem z výroby fosfátových hnojiv (O'Brien 1997).

Jak je vidět v tabulce 2, je radioaktivita popílků, strusky a fosfosádrovce a některých dalších průmyslových vedlejších produktů často výrazně vyšší než u většiny běžných stavebních materiálů.

Tabulka 2. Typické a maximální hmotnostní aktivity radionuklidů v běžných stavebních materiálech a vedlejších průmyslových produktech používaných v Evropě při produkci stavebních materiálů (Kovler 2009).

materiál	typická hmotnostní aktivita (Bq/kg)			maximální hmotnostní aktivita (Bq/kg)		
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
Běžné stavební materiály s možným obsahem vedlejších produktů						
beton	40	30	400	240	190	1600
pórobeton	60	40	430	2600	190	1600
cihly	50	50	670	200	200	2000
kámen	60	60	640	500	310	4000
sádra	10	10	80	70	100	200
Běžné průmyslové vedlejší produkty používané ve stavebních materiálech						
fosfosádrovec	390	20	60	1100	160	300
struska	270	70	240	2100	340	1000
popílky	180	100	650	1100	300	1500

Níže uvádím alespoň základní informace o typických vedlejších průmyslových produktech používaných při výrobě stavebních materiálů.

Velké množství uhelných popílků pocházejících z tepelných elektráren může v závislosti na vstupních surovinách obsahovat zvýšené množství radionuklidů, a to spolu s jinými toxickými prvky. Každoročně je produkováno více než 280 milionů tun popele z uhlí, z toho asi 40 milionů tun je dále používáno při výrobě cihel a cementu (IAEA 2003).

V případě fosfosádrovce se odhaduje, že například v roce 1996 bylo recyklováno až 15% tohoto materiálu a v zemích Evropské unie tak bylo recyklováno 2 milióny tun fosfosádrovce ročně (Smith 2001). Hmotnostní aktivita závisí na původu a chemickém zpracování původní suroviny: například fosfosádrovec z fosfátových hornin obsahuje obvykle značně zvýšené koncentrace <sup>226</sup>Ra oproti sedimentárnímu sádrovci. V každém případě nejen hmotnostní aktivita

$^{226}\text{Ra}$ , ale i emanace radonu ze stavebních materiálů, u kterých došlo k použití fosfosádrovce, může být vyšší, než je obvyklé (Kovler 2009). Používání fosfosádrovce na výrobu například sádrokartonu, může tedy logicky vést k obavám z extrémně vysokých aktivit  $^{226}\text{Ra}$  a následné vysoké emanaci radonu.

Vysokopecní struska se používá hlavně jako drcené kamenivo v betonu, stejně jako jemně mleté aditivum v cementu. Hmotnostní aktivita strusky závisí na typu původní rudní suroviny a hutnickém procesu, kterým byla původní surovina zpracována (Kovler 2009).

Popílky z uhlí a strusky použité v betonu jsou dobře známým zdrojem expozice gama záření, která je dána přítomností  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  a v menší míře  $^{40}\text{K}$ . Exhalace radonu je však sporná, a to vzhledem k nízkým koeficientům emanace z popela (Kovler 2005). Tyto odpadní materiály se používají k výrobě různých, většinou lehkých stavebních materiálů. Lehké stavební hmoty a sádrokarton jsou tedy typickými příklady s potenciálem zevní expozice.

Závěrem lze uvést, že ve vztahu k regulaci hmotnostní aktivity radionuklidů v průmyslových vedlejších produktech, odpadech a stavebních materiálech, jsou některé evropské předpisy adresované výhradně radioaktivitě odpadních materiálů a průmyslových vedlejších produktů, jiné pak nerozlišují mezi stavebními výrobky obsahující odpadní materiál a obvyklými stavebními výrobky.

### 3 EXTRÉMNI PŘÍPADY NEVHODNÝCH SUROVIN VE STAVEBNICTVÍ

#### 3.1 Domy v Jáchymově

Město Jáchymov, známé především ze středověku díky těžbě stříbra a od roku 1939 díky intenzivní těžbě uranu a závodům produkujících radium, je jedním z příkladů, kde docházelo k využívání nevhodného stavebního materiálu ke stavbě obytných domů. V případě Jáchymova došlo ke kontaminaci budov již v minulosti v období před II. Světovou válkou, a to hlavně díky stříbrnému a uranovému průzkumu a továrnám na uranové barvy a radium, kdy bohužel docházelo tehdy ke zcela pochopitelnému použití materiálů z odvalů při stavbách rodinných domů. Dále byly používány zbytky z místních továren na uranové barvy, které byly používány místo písku při výrobě omítek (Thomas, Drábová 1993). Kromě uvedeného do některých domů vyústíují i stará důlní díla, která jsou také zdrojem radonového zamoření objektu. Hmotnostní aktivity  $^{226}\text{Ra}$  dosahovaly v extrémních případech hodnot až do 1MBq/kg a vnitřní ozáření gama se pohybovalo v rozsahu 10-100  $\mu\text{Gy/h}$  (Hůlka a kol. 2008).

Kontaminace domů byla odhalena v sedmdesátých letech, ale v této době ještě v České republice (tehdy v ČSSR) neexistovala legislativní úprava, která by problematiku vnitřního ozáření osob řešila. Přijatá nápravná opatření v této době byla drastická, nejhorší budovy byly zbořeny a materiál byl mylně přetěžen v domnění, že z něj bude získána rudní surovina k dalšímu využití. Ostatní kontaminované domy byly řešeny až v devadesátých letech minulého století, tehdejší nápravná opatření však již byla založena na podrobném radonovém a gama průzkumu (Hůlka a kol. 2008).

Na popud Ministerstva životního prostředí České republiky byla v roce 1992 vypracována studie "Protiradiační ozdravná opatření v Jáchymově" (dále jen „POO“), nicméně při řešení konkrétních ozdravných opatření se naráželo na mnoho problémů, ať už ze strany obyvatel domů, tak ze strany zúčastněných podnikatelských subjektů. Příkladem za všechny lze uvést neschopnost obyvatel rozhodnout, zdali POO vůbec chtějí či nikoliv. Další problémy vyvstaly se stavebními firmami, neboť v roce 1992 sice existoval určitý seznam firem, které POO provádějí, ale ani jedna nebyla ze západočeského kraje. Dalším problémem byly i přemrštěné finanční požadavky stavebních firem. Financování ozdravných opatření probíhalo tehdy formou státního příspěvku, s čímž byly spojeny další problémy, jelikož mnoho ze subjektů po ukončení POO a následné kolaudaci požádalo o změnu

užívání části objektu k podnikatelským záměrům i přesto, že na místnosti určené k podnikání nemohl být státní příspěvek přidělen.

### 3.2 Pórobeton z Poříčí u Trutnova

V roce 1980 byla zjištěna skupina rodinných domů postavených z pórobetonu, pocházejícího z výroby v Poříčí u Trutnova (s hmotnostní aktivitou  $^{226}\text{Ra}$  až 1 kBq/kg). Pro ilustraci lze zmínit, že uvedené hodnoty překračovaly více než desetinásobně limity tehdy připravované normy. Za příčinu byl označen elektrárenský popílek, který byl používán při výrobě pórobetonu. Popílek pocházel z lokální elektrárny spalující černé uhlí z žacléřsko - svatoňovické uhelné pánve, konkrétně ze sloje Baltazar, která však byla bohatě uranově mineralizována (Principy a praxe radiační ochrany 2000, SÚRO). Vzhledem k vysokému koeficientu vyzařování tohoto materiálu (v rozmezí 15 – 30 %), byla v extrémních případech vnitřní koncentrace radonu až 1000 Bq/m<sup>3</sup>. Vnitřní míra dávky záření gama dosahovala rozmezí 0,1 – 0,3 µGy/h, což je horní hranice přirozeného venkovního pozadí v Čechách.

V období let 1963 – 1980 bylo z tohoto materiálu postaveno cca dvacet tisíc domů. Naštěstí byl však pórobeton používán ve většině případů jen jako malá část stavebního materiálu a tím i vnitřní koncentrace radonu překračovala intervenční úroveň jen u 1 – 2 % z těchto domů.

Pro efektivní zmírnění koncentrace radonu byly použity zejména metody centrálního a lokálního větrání. Současně byly testovány nejrůznější radonové bariéry (speciální barvy, tapety), ale bez dostatečných výsledků (Hůlka a kol. 2008).



Obr. 4. Elektrárna v Poříčí u Trutnova ([http://krkonosky.denik.cz/zpravy\\_region/elektrarna-zahaji-letni-odstavku20110707.html](http://krkonosky.denik.cz/zpravy_region/elektrarna-zahaji-letni-odstavku20110707.html)) 22. 08. 2011

### 3.3 Domy START

V tomto případě se jedná o cca tři tisíce montovaných rodinných domů (obr. 5.) ze škvárobetonových panelů vyráběných n. p. Prefa Hýskov v závodě Rynholec (u Nového Strašecí) zhruba v letech 1965 – 1983. K výrobě panelů byla použita škvára z bývalé místní elektrárny ERY (elektrárna Rynholec), která byla zásobena dolem ČSA (dříve důl Anna). Jde o výběžek Kladensko - rakovnické uhelné pánve, kde jsou některé uhelné sloje a proplástky obohaceny uranem. Haldy používané škváry byly tedy nabohaceny  $^{226}\text{Ra}$ , a to s hmotnostní aktivitou v rozpětí 1000 - 4000 Bq/kg (Thomas 1992).



Obr. 5. Montovaný rodinný domek START, n.p. Prefa Hýskov (Thomas 1992).

Ze škvárobetonu je v domech START postaveno obvodové zdivo, komín a pilíře. Tento materiál byl použit i přes to, že již v roce 1960 byly zaznamenány signály o zvýšeném záření gama z místních škvárobetonových bloků, a to v důsledku selhání dozoru nad výrobou. Kromě zvýšeného obsahu radia, které v tomto případě způsobilo i vyšší dávkový příkon gama uvnitř budov v průměru na pěti až desetinásobek přírodního pozadí, nesplňovaly panely ani tepelně izolační parametry, takže většina majitelů těchto domů byla nucena snížit infiltraci venkovního vzduchu, hlavně v topných sezonách a tím nechtěně zvýšit aktivitu radonu unikajícího ze zdiva. Aktivity radonu však překračovaly nejvýše dvojnásobek hygienické normy. Pro porovnání lze uvést, že v Jáchymově byly překročeny až stokrát (Principy a praxe radiační ochrany 2000, SÚRO). Situace se začala řešit ještě před rokem 1989. V pozdějších letech navrhla vláda České republiky, pod tlakem sdružení majitelů těchto domů, výkup nebo sanaci. Pro výkup se rozhodla asi stovka majitelů, ostatní přistoupili k realizaci protiradonových opatření.

## 4. SYSTÉM HODNOCENÍ PODLE PLATNÉ LEGISLATIVY

### 4.1 Limity, postup při překročení

Jak již bylo řečeno, systém hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech je zakotven v atomovém zákoně (a v jeho prováděcích předpisech, vyhláška 307/2002 Sb.), kde jsou stanoveny hodnoty, při jejichž překročení není možné stavební materiál uvádět do oběhu, resp. za účelem regulace přírodního ozáření ze stavebních materiálů musí být přijata opatření ke snížení tohoto obsahu v daném materiálu. Konkrétně se jedná o mezní hodnoty, viz. tabulka 3 a směrné hodnoty viz tabulka 4, přičemž mezní hodnoty jsou vyjádřeny hmotnostní aktivitou  $^{226}\text{Ra}$  a při překročení těchto hodnot nesmí být stavební materiál uváděn do oběhu.

Tabulka 3. Stavební materiály a mezní hodnoty hmotnostní aktivity  $^{226}\text{Ra}$ , při jejichž překročení se nesmí stavební materiál uvádět do oběhu (obsah podle tabulky č. 1 přílohy č. 10 vyhlášky 307/2002 Sb.).

Stavební materiál	Hmotnostní aktivita $^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	
	použití pro stavby s obytnými nebo bytovými místnostmi	použití výhradně pro stavby jiné než s obytnými nebo bytovými místnostmi
cihly a jiné stavební výrobky z pálené hlíny	150	500
stavební výrobky z betonu, sádry, cementu a vápna		
stavební výrobky z pórobetonu a škvárobetonu		
stavební kámen		
stavební výrobky z přírodního a umělého kameniva, umělé kamenivo	300	1000
keramické obkladačky a dlaždice		
písek, štěrk, kamenivo a jíly		
popílek, škvára, struska, sádrovec vznikající v průmyslových procesech, hlušina a kaly pro stavební účely, stavební výrobky z nich jinde neuvedené		
materiály z odvalů, výsypek a odkališť pro stavební účely kromě radiačních činností		
cement, vápno, sádra		



Směrné hodnoty (tabulka 4) obsahu přírodních radionuklidů jsou vyjádřeny indexem hmotnostní aktivity I, což je číslo určené na základě hmotnostních aktivit  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Th}$  a  $^{40}\text{K}$  vztahem  $I = aK/3000 \text{ Bq.kg}^{-1} + a\text{Ra}/300 \text{ Bq.kg}^{-1} + a\text{Th}/200 \text{ Bq.kg}^{-1}$ .

Při překročení směrné hodnoty se stavební materiály, které jsou určeny k přímému zabudování do staveb, mohou uvádět do oběhu jenom ve zdůvodněných případech, kdy náklady spojené se zásahem ke snížení obsahu radionuklidů, zejména změnou surovin nebo jejich původu, tříděním surovin, změnou technologie nebo jiným vhodným zásahem, by byly prokazatelně vyšší než rizika zdravotní újmy.

Pokud jsou stavební materiály s překročenou směrnou hodnotou určeny výhradně k použití jako surovina pro výrobu jiných stavebních materiálů, nevyžaduje se provedení jiných zásahů, než je prokazatelné informování odběratele o obsahu přírodních radionuklidů v předmětném stavebním materiálu. V tomto případě se náklady na zásah nezohledňují.

Tabulka 4. Směrné hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu (obsah podle tabulky č. 2 přílohy č. 10 vyhlášky 307/2002 Sb.).

<b>stavební materiál</b>	<b>index hmotnostní aktivity</b>
stavební materiály určené ke stavbě zdí, stropů a podlah ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi zejména zdící prvky, prefabrikované výrobky, tvárnice, cihly, beton, sádrokarton	0,5
ostatní stavební materiály určené k použití ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi	1
stavební materiály určené k použití jinému než ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi, veškeré stavební materiály určené výhradně k použití jako surovina pro výrobu stavebních materiálů	2

Stanovení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech musí být prováděno systematicky (jak vyplývá z platných právních předpisů), a to konkrétně v intervalech:

- jednou za rok od prvního uvedení materiálu do oběhu pro stavební materiály určené ke stavbě zdí, stropů a podlah ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi (zejména zdící prvky, prefabrikované výrobky, tvárnice, cihly, beton, sádrokarton);
- jednou za dva roky u ostatních stavebních materiálů určených k použití ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi; a
- jednou za pět let u stavebních materiálů používaných ke stavbám jiným než pobytových objektů.

Při překročení směrné nebo mezní hodnoty, je výrobce nebo dovozce stavebních materiálů povinen postupovat podle zásad stanovených právními předpisy; například při překročení mezní hodnoty, kdy hmotnostní aktivita  $^{226}\text{Ra}$  ve vzorku odebraném pro systematické měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu prokazatelně převyšuje mezní hodnotu uvedenou v tabulce 4, a to o více než je předpokládaná nejistota měření. Uvedené však platí i v případě,

že výsledek měření je pod hranicí předpokládaných nejistot. Důvodem je skutečnost, že překročení mezní hodnoty není v tomto případě možné vždy spolehlivě vyloučit. Pokud je překročení mezní hodnoty uvedené v tabulce 4 prokazatelně zjištěno, musí výrobce a/nebo dovozce stavebního materiálu okamžitě zastavit uvádění stavebního materiálu do oběhu, ověřit situaci odběrem a měřením dalších vzorků a pokud se překročení mezní hodnoty potvrdí, provést opatření ve výrobě, nebo dovozu tak, aby byla snižená hmotnostní aktivita  $^{226}\text{Ra}$  spolehlivě pod mezní hodnotu. Počet odběrů, rozsah analýz i rozhodnutí o tom, zda je ve stavebním materiálu překročena mezní hodnota konzultuje dovozce nebo výrobce stavebních materiálů se SÚJB.

Jak uvedeno shora při překročení směrné hodnoty, tedy indexu hmotnostní aktivity I uvedeného v tabulce 4, nesmí výrobce nebo dovozce stavebních materiálů uvádět materiál do oběhu s výjimkou případů, kdy by byly náklady spojené se zásahem ke snížení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu prokazatelně vyšší než rizika zdravotní újmy. Zákonným odůvodněním tohoto požadavku je povinnost výrobce či dovozce stavebních materiálů optimalizovat radiační ochranu, tedy snížit ozáření z vyráběných a/nebo dovážených stavebních materiálů na co nejnižší dosažitelnou úroveň se zohledněním hospodářských a společenských faktorů. Za správné provedení optimalizace radiační ochrany, tj. za porovnání nákladů na zásahy (opatření) ke snížení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebním materiálu se snížením rizika zdravotní újmy, za úplnost a správnost použitých vstupních údajů, za úplnost posuzovaných opatření a za případnou realizaci opatření, odpovídá výrobce nebo dovozce. Jako doklad naplnění uvedené podmínky zákona pro uvádění stavebního materiálu s překročenou směrnou hodnotou do oběhu slouží postup stanovený SÚJB. Takový postup se však neaplikuje na situaci, kdy jsou stavební materiály s překročenou směrnou hodnotou určeny výhradně k použití jako surovina pro výrobu jiných stavebních materiálů. V tomto případě, jak uvedeno shora, je povinností pouze prokazatelně informovat odběratele tohoto materiálu o obsahu přírodních radionuklidů. Současně nesmí být opomenuta povinnost výrobce nebo dovozce stavebního materiálu poskytnout výsledky měření obsahu přírodních radionuklidů na vyžádání veřejnosti (SÚJB 2009).

Výrobci a dovozci stavebních materiálů zajišťují systematické měření obsahu přírodních radionuklidů prostřednictvím měřicích laboratoří. Tyto laboratoře jsou držiteli povolení SÚJB k této činnosti. Jedná se o povolení podle § 9 odst. 1 písm. r) zákona č. 18/1997 Sb., ve znění pozdějších předpisů k provádění služeb významných z hlediska radiační ochrany, měření a hodnocení ozáření z přírodních radionuklidů. Seznam těchto subjektů a postup pro získání povolení lze najít na internetových stránkách SÚJB ([http://www.sujb.cz/aplikace/radon/?action=show&table=tab\\_a&lang=cz](http://www.sujb.cz/aplikace/radon/?action=show&table=tab_a&lang=cz)).

## 5. DISKUZE

Je nutné si uvědomit, že systém hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech do jisté míry reflektoval zjištění, že v minulosti byly v některých případech používány extrémně nevhodné stavební suroviny, např. materiály z odvalů po uranové těžbě. Důvodem však byla tehdy neznalost účinků ionizujícího záření. Je tedy zřejmé, že něco takového by se již nemělo dnes stávat, a to nejen díky systematickému hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech, ale i celkově zvýšené úrovni znalosti radiační problematiky.

Otázkou však zůstává, zdali samotné hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech není zacíleno příliš plošně a u některých stavebních materiálů pravděpodobně i nadbytečně. Například hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech probíhá u materiálů určených ke stavbě zdí, stropů a podlah ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi nejméně jednou za rok (dle vyhlášky 307/2002 Sb., o radiační, ve znění pozdějších předpisů). K těmto materiálům patří zejména zdící prvky, mezi které jsou řazeny i cihly, na které dopadá norma hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve své podstatě bezdůvodně. Vzhledem k vysokým obsahům  $^{40}\text{K}$ , kde se průměrná hmotnostní aktivita  $^{40}\text{K}$  pohybuje ve výši 670 (Bq/kg) (dle SÚRO 2000), je patrné, že při výpočtu indexu hmotnostní aktivity překročíme hodnotu 0,5, vyjadřující přípustnou směrnou hodnotu určenou shora uvedenou vyhláškou. Při překročení této směrné hodnoty je výrobce nebo dovozce dotčeného stavebního materiálů nucen postupovat podle platných zákonných předpisů, a to buď tak, že provede tzv. optimalizaci radiační ochrany nebo upřesní situaci odběrem a analýzou dalších vzorků a dále pokračuje podle postupu stanoveného SÚJB.

Další otázkou zůstává, nakolik jsou výsledky měření obsahu radionuklidů relevantní vůči velikosti odebíraných vzorků a jak může toto systematické měření dopadnout například na malé lokální producenty stavebních materiálů. V případě produkce stavebních materiálů dochází v mnoha případech k mechanickému zpracování přírodních surovin. Do výroby tedy nevstupují žádné druhotné suroviny z průmyslové výroby, u kterých by se dalo předpokládat, že mohou obsahovat nejen zvýšené množství radionuklidů, ale i jiných toxických látek. Navíc je v mnohých případech stavební materiál vyráběn z jednoho zdroje, kde se nedá předpokládat, že by se obsah přírodních radionuklidů mohl nějak výrazně měnit. Proto lze říci, že hlavně lokální producenti stavebních materiálů, čerpající například dlouhodobě kamenivo z jednoho lomu, jsou systémem hodnocení přírodních radionuklidů do jisté míry omezováni, neboť dochází ke zcela zbytečnému vynakládání finančních prostředků na frekventované měření obsahu radionuklidů a tím v konečném důsledku ke zvyšování ceny produktu. V této situaci by tak postačovalo, kdyby v takovýchto případech docházelo k měření obsahu přírodních radionuklidů a jiným kvalitativním testům pouze v případě signifikantní změny vstupní suroviny, tedy například změny lokality těžby či dodavatele.

Nelze popřít, že hodnocení obsahu přírodních radionuklidů je důležité z hlediska radiační ochrany, nicméně v dnešní době již disponujeme přesnými údaji, které materiály mohou obsahovat zvýšené množství radionuklidů. Dá se dokonce o těchto případech hovořit jako o typických a týká se to zejména stavebních materiálů, kde se při výrobě používá druhotných průmyslových surovin, tedy například odpadů z výroby jiných produktů. Na tyto materiály je obvykle pohlíženo bohužel tak, že se jedná o materiály ekologické, protože při jejich výrobě došlo ke spotřebování odpadů. Mezi tyto materiály je možné zařadit například sádrokarton, kde je možné očekávat až extrémní hodnoty  $^{226}\text{Ra}$  a vysoké emanace tohoto materiálu, a to z důvodu použití fosfosádrovce při výrobě sádrokartonu (Kovler 2009). Lze také očekávat pravděpodobnost zvýšeného obsahu jiných toxických prvků například As, Cd a jiných kovů. Takové materiály jsou tak z hlediska nejen radiační ochrany, ale i z hlediska toxicity dosti rizikové.

Bylo by tak vhodné legislativně rozdělit stavební materiály na přírodní a materiály, u kterých do výroby vstupují druhotné produkty, a tento systém následně ucelit i z hlediska Evropské unie. Vzhledem k tomu, že v současné době není běžný stavební materiál (drcené kamenivo, beton, cihly atd.) typickou vývozní komoditou, nepovažuji za nutné, aby byly sjednoceny i konkrétní limitní hodnoty obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech. Už vzhledem k tomu, že rozložení přirozeného radiačního pozadí na světě není rovnoměrné.

## 6. ZÁVĚR

Systematické měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech je proces, který od samého počátku svého zavedení prochází změnami reflektující aktuální požadavky dnes už Evropské unie z hlediska radiační ochrany. Je tedy logické, že se usiluje o jisté sjednocení a harmonizaci systematického měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech napříč členskými státy Evropské unie. V této souvislosti je tak třeba přihlédnout ke skutečnosti, že obsahy přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech se výrazně liší mezi zeměmi i jednotlivými oblastmi. Je tedy nutné, aby evropská doporučení z hlediska radiační ochrany brala v úvahu specifické podmínky jednotlivých států tak, aby nedošlo k omezení jednotlivých lokálních výrobců stavebních materiálů a nepodporoval se tak uměle dovoz v oblasti běžných stavebních materiálů, neboť tento postup nelze hodnotit jako žádoucí.

Je však třeba zdůraznit, že systematické sledování a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech prodělalo za posledních několik desetiletí a zejména v posledních dvaceti letech obrovský vývoj a přispělo tak ve své podstatě k eliminaci rizik spojených s používáním problematických stavebních surovin.

## 7. LITERATURA

Darby, S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios JM., Baysson H., Bochicchio F., Deo H., Falk R., Forastiere F., Hakama M., Heid I., Kreienbrock L., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W., Pershagen G., Ruano-Ravina A., Ruosteenoja E., Schaffrath Rosario A., Tirmarche M., Tomášek L., Whitley E., Wichmann H., Doll R., 2004. *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*. British Medical J, doi:10.1136/bmj.38308.477650.63 (published 21 December 2004)

Darby, S. et al. 2006 Residential Radon and Lung Cancer: Detailed Results of a Collaborative Analysis of Individual Data on 7,148 Subjects with Lung Cancer and 14,208 Subjects without Lung Cancer from 13 Epidemiological Studies in Europe. *Scand J Work Environ Health*. 32(1): 1-83., 2006

Hála J., 1998: *Radioaktivita ionizující záření jaderná energetika*. Konvoj, Brno, 310 str.

IAEA 2003. Extent of environmental contamination by naturally occurring radioactive material (NORM) and technological options for mitigation, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency (IAEA); 2003.

Jiránek M., Pospíšil S. 1993. *Radon a dům*, AFB nadace pro rozvoj architektury a stavitelství, Praha, 48 str.

Kovler K., 2009. Radiological constraints of using building materials and industrial by-products in construction. *Construction and Building Materials* 23 (2009) 246–253.

Kovler K., Perevalov A., Steiner V., Metzger L.A., 2005. Radon exhalation of cementations materials made with coal fly ash: Scientific background and testing of the cement and fly ash emanation. *J. Environ Radioactivity*; 82(3):321–34.

Krewski, D. et al., 2006. A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*. 69(7):553-597, 2006

Krewski, D. et al. 2005. Residential Radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology*. 16(2): 137-140, 2005

Kukal Z., Reichmann F., 2000. *Horninové prostředí České republiky jeho stav a ochrana*. ČGÚ, Praha, 189 str.

Lubin, J. at al., 2004. Risk of Lung Cancer and Residential Radon in China: Pooled Results of Two Studies. *International Journal of Cancer*. 109(1): 132-137., 2004

Pytlík P., 1997. *Ekologie ve stavebnictví*, SIA – Stavební informační agentura, Praha, 136 str.

Hůlka J., Vlček J., Thomas J., 2008. Natural Radioactivity in Building Materials – Czech experience and European Legislation. *Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists 2008 International Symposium Las Vegas NV*, September 14 – 17, 2008. AARST 2008

Matolín M., 1970. *Radioaktivita hornin Českého masívu*. Ústřední ústav geologický – Geofond, Praha, 99 str.

O'Brien R.S., 1997. Gamma doses from phosphogypsum plaster-board. *Health Phys*, 72(1): 6-96.

Smith K.R., Crockett G.M., Oatway W.B., Harvey M.P., Penfold J.S.S., Mobbs S.F. 2001. *Radiological impact on the UK population of industries which use or produce materials containing enhanced levels of naturally occurring radionuclides, Part I: coal-fired electricity generation*. Chilton, UK: NRPB-R237, National Radiological Protection Board; 2001.

SÚJB, kolektiv autorů 2000. *Principy a praxe radiační ochrany*. Editor: Klener V., vydal: Azin CZ, 2000, pro Státní úřad pro jadernou bezpečnost v Praze, 619 str.

Šáro Š., Tölgyessy J., 1985. *Rádioaktivita prostredia*. Alfa, Bratislava, 302 str.

Thomas J., 2002. Radioaktivita stavebních materiálů a elektrárenských popílků. *Topenářství instalace*. 2002(5): 62-64.

Thomas J., Drábová D., 1993. Wastes from the former uranium paint factory at Joachimstal (Jáchymov) used in dwellings. *Environment International*. 19( 5): 509 – 512.

Thomas J., 1992. Problematika domů START. *Sborník přednášek Konference opatření proti radonu*, Jihlava (České republiky), listopad 23-25, 1992, str. 110 – 118.

Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění pozdějších předpisů

Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a zdrojů ionizujícího záření, ve znění pozdějších předpisů

[www.icrp.org](http://www.icrp.org) , 10. 08. 2011

<http://www.ornl.gov/sci/buildingsfoundations/handbook/section1-4.shtml>, 15. 08. 2011

<http://radon-servis.cz/1-co-je-to-radon.htm>, 10. 08. 2011