

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Zdravotně sociální fakulta

Radionuklidy v životním prostředí

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Jiří Havránek

Zpracoval: Levý Leoš

Datum: 16. 05. 2008

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Radionuklidy v životním prostředí vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce a to v nezkrácené podobě/v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zdravotně sociální fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích

.....
Levý Leoš

Touto cestou bych chtěl poděkovat Mgr. Jiřímu Havránkovi za pomoc při zpracování této práce.

Abstract

Radionuclides occurring in the environment on Earth can be divided according to the mechanism of their origin into three main groups. Cosmogenic radionuclides are formed by continual cosmic radiation on the nuclei of stable elements especially in the upper levels of the atmosphere. Terrestrial radionuclides originate directly on our planet. The last group represent anthropogenic radionuclides which occur in the environment due to a controlled activity of man (e.g. nuclear plant outlets) or due to various accidents (the Chernobyl nuclear plant accident). For all mentioned radionuclides I give a description of their occurrence and concentration in the environment and their proportion on the total effective rate a man receives per year. Due to the fact that radon can represent up to 50 % of the total effective rate, it is dealt with in a special chapter. The paper aims at creating a unified overview of occurrence of radionuclides in the environment. To carry out this paper I presumed that there is an insufficient awareness in the inhabitants of the Czech Republic concerning this issue (lack of interest on the part of the population, reception of unverified, incomplete or misrepresented information from mass media or various interest groups). The questionnaire survey, the results of which are part of this paper, confirmed this premise and therefore it is possible to use this paper to improve the awareness concerning the dealt with issue.

Obsah:

Úvod	6
1 Současný stav dané problematiky	7
1.1 Radioaktivita a ionizující záření.....	7
1.1.1 Druhy radioaktivních přeměn	7
1.2 Přehled rozdělení dávek obyvatelstvu	9
1.3 Přírodní radioaktivita.....	10
1.3.1 Rozdělení přírodních radionuklidů	11
1.3.2 Kosmogenní radionuklidy	11
1.3.2.1 Přehled kosmogenních radionuklidů.....	12
1.3.3 Terestrální radionuklidy.....	13
1.3.3.1 Obsah terestrálních radionuklidů v prostředí	14
1.3.3.2 Vnější expozice způsobená terestrálními radionuklidy.....	16
1.3.3.3 Vnitřní expozice způsobená terestrálními radionuklidy (mimo radon).....	17
1.3.3.4 Expozice způsobená ⁴⁰ K	18
1.3.3.5 Expozice způsobená terestrálními radionuklidy deponovanými v organismu	19
1.4 Radon a jeho rozpadové produkty.....	19
1.4.1 Zdroje radonu v atmosféře.....	20
1.4.2 Zdroje radonu v budovách.....	21
1.4.3 Efektivní dávka způsobená radonem	23
1.5 Přírodní radionuklidy uvolňované do životního prostředí průmyslovou činností člověka....	24
1.6 Radionuklidy pocházející z testování nebo použití jaderných zbraní	24
1.7 Radionuklidy pocházející z jaderně energetického cyklu	26
1.8 Radionuklidy uvolněné do prostředí haváriemi a nehodami	27
2 Cíle práce a hypotézy	29
3 Metodika	30
4 Výsledky	31
5 Diskuze.....	43
6 Závěr	51
7 Seznam použité literatury	52
8 Klíčová slova.....	54
9 Přílohy	55

Úvod

Bakalářskou práci na téma „Radionuklidy v životním prostředí“ jsem si vybral proto, že mi tato problematika připadá velice zajímavá a rád bych rozšířil znalosti v této problematice. Cílem mé práce je vytvořit ucelený přehled výskytu radionuklidů v životním prostředí a ten potom využít k přiblížení problematiky čtenářům. První část mé bakalářské práce popisuje rozdělení přírodních radionuklidů, popis jejich výskytu a koncentrací v životním prostředí a jejich podíl na celkové efektivní dávce, kterou člověk za rok obdrží. Díky faktu, že radon může z celkové efektivní dávky tvořit až 50 % je mu věnována samostatná kapitola. V další části se zabývám přírodními radionuklidy, které se ale do životního prostředí uvolnily různými průmyslovými činnostmi člověka. Poslední část se věnuje radionuklidům, které vznikly a do životního prostředí se dostaly úmyslnou (testování jaderných zbraní) nebo neúmyslnou (havárie jaderných zařízení) činnostmi člověka. Kvůli zjištění současné informovanosti obyvatelstva o dané problematice jsem zpracoval dotazníkovou akci a následně ji vyhodnotil. Podle mého předpokladů není informovanost o této problematice na vysoké úrovni. Často jsem se také setkal s přejímáním neověřených, neúplných nebo zkreslených informací od hromadných sdělovacích prostředků nebo různých zájmových sdružení. Doufám, že se čtenář při čtení této práce dozví užitečné a praktické informace a rozšíří si znalosti v této problematice.

1 Současný stav dané problematiky

1.1 Radioaktivita a ionizující záření

Radioaktivita je schopnost nestabilních atomových jader samovolně se přeměňovat na jádra jiná, která mohou být opět radioaktivní nebo již stabilní. Je to přirozený jev u jader s nadbytkem energie, které se tímto chtějí tohoto přebytku zbavit a tím se dostat do stabilnějšího stavu. Energie je uvolňována emisí určité částice nebo elektromagnetického vlnění. Ionizující záření je souhrnné označení pro záření, jejichž hmotné částice nebo fotony elektromagnetického vlnění mají dostatek energie ionizaci atomů ozářené látky nebo k excitaci jader ozářené látky. Za běžného stavu se elektrony nacházejí na svých energetických hladinách. Ionizace je proces, kdy je elektronu dodána taková nadbytečná energie, že se dostane na vyšší energetické hladiny, až se z atomu úplně uvolní. Pokud je elektronu dodána menší energie než je potřeba k ionizaci, poskočí tento elektron pouze na vyšší energetickou hladinu. Tam zůstává, dokud o nadbytečnou energii opět neztratí a nevrátí se na své původní místo. Přebytečná energie je vyzářena v podobě elektromagnetického vlnění. Tento proces se nazývá excitace (10).

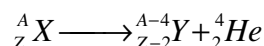
Ionizující záření lze podle své formy rozdělit na dvě skupiny. Korpuskulární ionizující záření je charakteristické tím, že má určitou klidovou hmotnost, elektrický náboj a kinetickou energii. Mezi korpuskulární ionizující částice patří například α částice, neutrony, elektrony, mezony a další (10).

Ionizující záření tvořené fotony má duální charakter. To znamená, že má vlastnosti jak částic tak elektromagnetického vlnění. Mezi takovéto ionizující záření tvořené fotony patří například γ záření nebo rentgenové záření. Fyzikálně jsou to téměř totožné záření. Liší se pouze svojí energií a způsobem vzniku (10).

1.1.1 Druhy radioaktivních přeměn

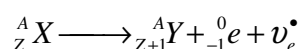
α přeměna je charakteristická pro velmi těžké přirozené radionuklidy. α částice se skládá ze dvou protonů a dvou neutronů, jedná se tedy o heliové jádro ${}^4_2\text{He}$. Po vyzáření α částice se protonové číslo původního prvku sníží o dvě a nukleonové číslo o

čtyři. Rychlost α částice se pohybuje řádově kolem 10^7 m.s^{-1} . Pronikavost α záření není vysoká, ve vzduchu se pohltní na dráze několika centimetrů, ve tkáních na několika mikrometrech. Jeho šíření zastaví i list papíru nebo lidská kůže. Pro člověka je nebezpečné pouze pokud se dostane přímo do organismu. Vzhledem k velké energii obsažené v heliovém jádře je pro organismus člověka ze všech druhů záření nejtoxičtější. Při α rozpadu se radionuklidy rozpadají podle následujícího vzorce (10).

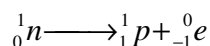


Přeměnu β je možno rozdělit na dvě části. Při přeměně β^- , jsou z jádra radionuklidu emitovány elektrony, při β^+ pozitrony. Rychlost β částic se pohybuje řádově kolem 10^8 m.s^{-1} . β záření je pronikavější záření α , jeho dolet ve vzduchu jsou desítky centimetrů a ve tkáních centimetry. K odstínění β záření je vhodné použít látky s nízkým protonovým číslem (hliník), protože při interakci β záření s látkami s vysokým protonovým číslem (olovo) vzniká brzdné rentgenové záření (10).

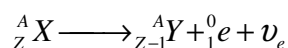
Při přeměně β^- , se z jádra emituje elektron a antineutrino. Radionuklidy se rozpadají podle následujícího vzorce (10).



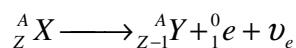
Protonové číslo nově vzniklého prvku bude o 1 vyšší, nukleonové číslo se nemění. Emitovaný elektron vzniká v jádře z neutronu následnou reakcí (10).



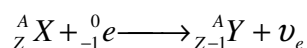
Při rozpadu β^+ se z jádra emituje pozitron a neutrino. Radionuklidy se rozpadají podle následujícího vzorce (10).



Protonové číslo nově vzniklého prvku bude o 1 menší, nukleonové se nemění. Pozitron je antičástice k elektronu. Má tedy všechny vlastnosti elektronu ale opačný náboj. Pozitron vzniká v jádře následující reakcí (10).



Elektronový záchyt je jediným druhem radioaktivní přeměny, na kterém se podílí i elektronový obal radionuklidu (podle některých názorů patří do přeměny β). Jádro zachytí elektron z elektronového obalu a následně v něm dojde k přeměně protonu na neutron a vyzáření neutrina. Elektronový záchyt vystihuje tato rovnice (10, 12).

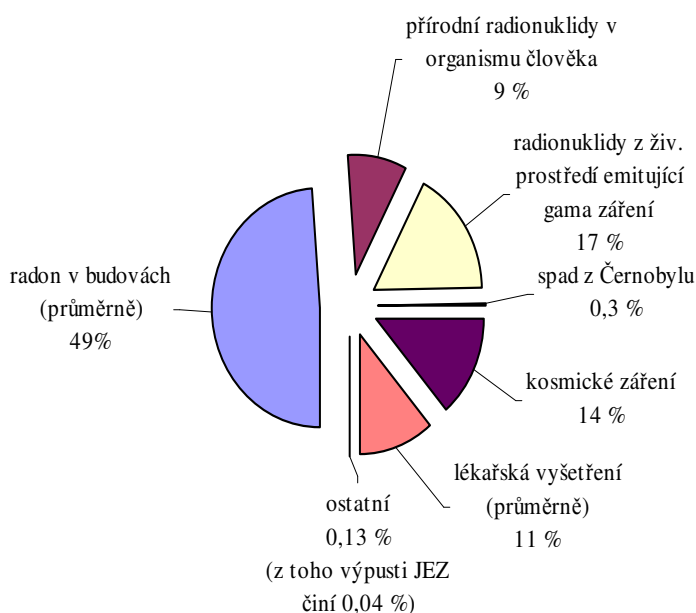


Přeměna γ u přirozeně radioaktivních prvků doprovází výskyt záření α i záření β . γ záření vzniká vyzářením elektromagnetického záření při návratu částice z vybuzeného (excitovaného) do základního stavu. Vyzářením γ záření se nemění ani protonové ani nukleonové číslo prvku, protože nedochází emisi žádné částice, ale jedná se o vyzářením záření o určitém kvantu energie. Toto záření je nejpronikavější ze všech tří typů. Ve vzduchu má dosah několik metrů a stejně je tomu tak i ve tkáních. Lze ho oslabit silnou vrstvou materiálu, který je tvořen jádry těžkých prvků, např. olovo (10).

Existují ještě další druhy radioaktivních přeměn, ale jejich četnost je oproti výše zmíněným velmi malá. Jedná se o samovolné štěpení velmi těžkých jader na 2 jádra lehčí za současné emise několika neutronů, protonovou radioaktivitu a emisi sudosudých jader (^{12}C) z těžkých jader (10).

1.2 Přehled rozdělení dávek obyvatelstvu

Na následujícím grafu je přehled rozdělení dávek obyvatelstvu. Je z něj zřejmé, že nejvíce se na ní podílí radon, a proto je mu také věnována samostatná kapitola v této práci. Radon společně s dalšími přírodními radionuklidy (gama ze země a přírodní radionuklidy v těle člověka) se na celkové dávce podílí průměrně 75 %. Dohromady 25 % tvoří ozáření způsobené kosmickým zářením a lékařskými vyšetřeními (tyto dvě skupiny nejsou v této práci zahrnuty) (5).



1.3 *Přírodní radioaktivita*

Přírodní radioaktivita se dělí na dvě hlavní části. První částí je kosmické záření dopadající na Zemi z vesmíru. Kosmické záření je původcem hlavně externího ozáření populace. Radiační zátěž se liší podle nadmořské výšky a polohy daného objektu na zemi. Tato radiační zátěž je způsobena pouze třemi (galaktické kosmické záření, sluneční kosmické záření, záření radiačních pásů Země) z celkového počtu složek kosmického záření. Hlavní složkou kosmického záření jsou protony lišící se podle svého původu hodnotou energie. Mezi další částice kosmického záření patří elektrony a jádra prvků periodické soustavy prvků. Právě interakcemi částic kosmického záření a dalších prvků vznikají kosmogenní radionuklidy, kterým bude věnována pozornost v dalších kapitolách. Kosmické záření samo o sobě ovšem nenaplňuje podstatu radionuklidu, a proto se jím tato práce nebude dále zabývat (4; 13).

Druhou složku přírodní radioaktivity tvoří přírodní radionuklidy. Tyto radionuklidy (nuklidy s jádrem podléhajícím radioaktivní přeměně) se na Zemi vyskytují nepřetržitě a to již od doby jejího vzniku. Pojmy radionuklid a životní prostředí tedy k sobě neodmyslitelně patří. Přestože je v poslední době pozornost soustředěna převážně na radionuklidy, které souvisí s činností člověka, je potřeba si uvědomit, že stejná pozornost by měla být věnována právě radionuklidům přírodním. Tyto radionuklidy se vyskytují po celé Zemi a jejich působení je životní prostředí a tedy i lidstvo nevyhnutelně vystaveno. Rozložení přírodních radionuklidů v zemském povrchu není rovnoměrné. V některých oblastech je jejich výskyt oproti celosvětovému průměru několikanásobně vyšší. V těchto oblastech mohou být dávky obdržené od přírodních radionuklidů srovnatelné s dávkami vyvolávajícími deterministické účinky. Zejména z tohoto důvodu je jim potřeba věnovat stejnou pozornost jako radionuklidům umělým.

Radiační zátěž způsobená radionuklidy, které se nacházejí v životním prostředí, je v některých případech ovlivnitelná a v těchto případech je vhodné ji regulovat patřičnými ochrannými opatřeními (např.: protiradonová opatření v budovách) (13).

Radionuklidy vyskytující se v životním prostředí na Zemi je tedy možno rozdělit podle mechanismu jejich vzniku do tří hlavních skupin. Kosmogenní radionuklidy jsou takové, které vznikají kontinuálním působením kosmického záření na jádra stabilních

prvků. Terestrální radionuklidy jsou takové, které pocházejí přímo z naší planety. Poslední skupinou jsou radionuklidy antropogenní, které se do životního prostředí dostávají kontrolovanou činností člověka (např.: vypustě u jaderných elektráren) nebo při různých nehodách či haváriích (havárie Černobylské jaderné elektrárny) (13).

1.3.1 Rozdělení přírodních radionuklidů

Přírodní radionuklidy jsou pouze takové, které vznikly nebo vznikají výhradně činností přírody. Podle mechanismu vzniku a původu je lze rozdělit na radionuklidy kosmogenní, primordiální a radionuklidy vzniklé sekundárně z primordiálních (4; 13).

- a) kosmogenní radionuklidy vznikají kontinuálně, především v horních částech atmosféry, jadernými reakcemi jader stabilních prvků s prvky kosmického záření. Tímto způsobem vzniká například izotop ^{14}C a další (4; 13).
- b) primordiální radionuklidy vznikly při utváření samotného vesmíru a následně byly začleněny do Země. Ty z nich, které mají velmi dlouhé poločasy rozpadu (delší než 10^8 let) se stále nacházejí v zemské kůře. Mezi tyto patří například ^{238}U , ^{235}U , ^{40}K , ^{87}Rb a další. Původně byl inventář primordiálních radionuklidů širší, ale ty s kratšími poločasy rozpadu se již úplně rozpadly a nemohou být tedy již nalezeny (4; 13).
- c) radionuklidy sekundární vznikly z radionuklidů primordiálních systémem rozpadových řad. Se čtvrtou rozpadovou řadou, neptuniovou, vycházející od ^{237}Np se již v přírodě nesetkáme. Tento fakt je způsoben krátkými poločasy rozpadu prvků, které ji tvořily. Tři stále existující rozpadové řady (uran-radiová, thoriová, aktiniová) jsou uvedeny v přílohách, schémata 1, 2 a 3 (4; 13).

1.3.2 Kosmogenní radionuklidy

Kosmické záření produkuje řadu radionuklidů v atmosféře, biosféře a litosféře různými jadernými reakcemi. Přehled všech kosmogenních radionuklidů a jejich fyzikálních vlastností je uveden v přílohách, tabulka 1. Nejvýznamnější z těchto radionuklidů vzhledem k radiační zátěži lidstva jsou ^{14}C , ^3H , ^7Be a ^{22}Na . Nejčastějším

způsobem průniku těchto radionuklidů do lidského organismu je ingesce látek kontaminovaných těmito radionuklidy (20).

1.3.2.1 Přehled kosmogenních radionuklidů

Nejdůležitějším z těchto radionuklidů je ^{14}C . Přírodní ^{14}C je produkován ve vyšších vrstvách atmosféry reakcí $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$, která je zahájena pomalými neutrony kosmického záření. Roční přírodní produkce ^{14}C je 1PBq. Specifická aktivita ^{14}C je 227 Bq v jednom kilogramu uhlíku v lidském těle, což vede k efektivní dávce 12 μSv . Prostorová různorodost radiační zátěže způsobené ^{14}C není významná. Distribuce ^{14}C v organismu a absorbované dávky ve vybraných orgánech jsou uvedeny v přílohách, tabulka 2 (20).

Hlavním zdrojem přírodního tritia je atmosféra, kde tritium vzniká reakcemi neutronů kosmického záření s jádry dusíku a kyslíku. Okolo 99 % tritia je zabudováno do molekul vody ve kterých se účastní vodního cyklu. Před začátkem rozsáhlých testů jaderných zbraní byla průměrná aktivita tritia 200 – 900 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ve vodách na pevnině a 100 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ve vodách oceánských. Tritium se dostává do potravního řetězce společně s vodou a zčásti se zabudovává do organických materiálů, včetně lidských tkání. Je proto původcem jak vnějšího tak vnitřního ozáření lidského organismu. Jeho distribuce v organismu a tudíž i absorbovaná dávka (přílohy, tabulka 3) v postižených orgánech je rovnoměrná (20).

^7Be vzniká v atmosféře interakcemi kosmického záření s jádry dusíku a kyslíku. Průměrné objemová aktivita ^7Be v atmosféře je 12,5 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Hlavní cesta ^7Be do organismu je ingesce listnaté zeleniny. Touto cestou se průměrně ročně dostane do organismu 1000 Bq ^7Be , což vede k roční efektivní dávce 0,03 μSv . Ve srovnání s významnějšími radionuklidy v oblasti radiační zátěže je tato dávka ovšem nepatrná.

Průměrná roční produkce a koncentrace kosmogenních radionuklidů není stejná, liší se v závislosti na různorodých podmínkách vzniku daného radionuklidu. Hodnoty těchto produkcí a koncentrací jsou uvedeny v přílohách, tabulka 4 (20).

Radiační zátěž způsobená ^3H , ^7Be a ^{22}Na je mnohem nižší než je tomu u ^{14}C . Průměrný jednotkový příjem a průměrné roční efektivní dávky způsobené

kosmogenními radionuklidy (vypočítané pomocí průměrného příjmu daného radionuklidu a konverzního faktoru dávky na jednotku příjmu) jsou uvedeny v přílohách, tabulka 5 (20).

1.3.3 Terestrální radionuklidy

Radionuklidy pozemského původu (také nazývány primordiální radionuklidy) se v různých stupních koncentrace vyskytují ve všech látkách na Zemi, dokonce i v lidském těle. Jenom ty radionuklidy s poločasy rozpadu srovnatelnými se stářím Země a jejich rozpadové produkty se vyskytují v životním prostředí ve významných koncentracích. Externí ozáření lidského těla je způsobeno převážně gama zářením radionuklidů thoriové a uran-radiové rozpadové řady a ^{40}K . Tyto radionuklidy jsou také přítomny v lidském těle, kde ozařují vnitřní orgány alfa, beta i gama zářením. K radiační zátěži lidského organismu přispívají i další terestrální radionuklidy, jako například ^{87}Rb , ^{138}La , ^{147}Sm a ^{176}Lu . Tyto se ovšem vyskytují v nižších koncentracích a proto i jejich podíl na celkovém ozáření je malý. Uran-radiová a thoriová rozpadová řada obsahují ve svých přeměnových produktech ^{222}Rn (^{220}Rn v thoriové). Radon a jeho rozpadové produkty mohou v závislosti na podmínkách tvořit až 50 procent celkové roční zátěže lidského organismu. Fyzikální vlastnosti jednotlivých terestrálních radionuklidů jsou uvedeny v přílohách, tabulky 6, 7, 8 a 9 (4; 20).

Radiační zátěž způsobená terestrálními radionuklidy není na různých místech Země konstantní. Tyto rozdíly jsou způsobeny převážně geologickými procesy, které měly za následek nerovnoměrné rozdělení radionuklidů v zemské kůře. Díky těmto procesům se na světě vyskytují místa s extrémními dávkovými příkony od terestrálních radionuklidů, které několikanásobně převyšují světový průměr. Světové lokality s takto zvýšeným dávkovým příkonem od terestrálních radionuklidů jsou uvedeny v přílohách, tabulka 10 (4; 20).

Dalším problémem je fakt, že stavební materiály mohou také obsahovat velká množství terestrálních radionuklidů a to v závislosti na obsahu radionuklidu v surovinách ze kterých byly vyrobeny (4; 20).

1.3.3.1 Obsah terestrálních radionuklidů v prostředí

Externí expozice je způsobená především terestrálními radionuklidy emitujícími záření gama, které se nacházejí ve svrchních vrstvách půdy a hornin. Specifické úrovně aktivit jednotlivých hornin záleží na původu dané horniny nebo na hornině ze které vznikla sledovaná půda. Vyvřelé horniny (např.: žula) mají obecně vyšší úrovně aktivit než horniny přeměněné (pararuly). Horniny vzniklé sedimentací (pískovec) mají zpravidla velmi nízké hodnoty aktivit. Existují ovšem i výjimky z tohoto pravidla, např.: u některých břidlic nebo fosfátových hornin je možno naměřit poměrně vysoké hodnoty aktivit. Hmotnostní aktivity významných radionuklidů (^{40}L , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K) se podle horniny, ve které se nacházejí, mohou lišit až o několik řádů. Typické hodnoty aktivit se pro ^{226}Ra a ^{238}U nacházejí v rozmezí 1 až 1000 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. V uranových rudných žilách může aktivita dosáhnout hodnot až desetitisíců $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Aktivita ^{232}Th se obvykle pohybuje v rozmezí 1 až 100 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Existují ovšem i lokality, kde aktivita ^{232}Th dosahuje až 1000 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Aktivita ^{40}K se pohybuje od 70 do 1800 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Celosvětové průměrné hodnoty půdních aktivit významnějších terestrálních radionuklidů jsou uvedeny v přílohách, tabulka 11 (4; 20).

Terestrální radionuklidy se mohou uvolňovat do vod. Děje se tomu tak na základě složitých fyzikálních, geochemických a hydrologických vztahů mezi horninou a vodou. Nejvyšší hodnoty aktivit má podzemní voda, která byla dlouho v kontaktu s horninami s vyšším obsahem terestrálních radionuklidů. Rychlost přestupu radionuklidů z hornin do vod záleží na tzv. rozdělovacích koeficientech. Hodnota těchto rozdělovacích koeficientů závisí na výše zmíněných fyzikálních, geochemických a hydrologických faktorech. Pro významnější radionuklidy se rozdělovací koeficienty uvádějí v těchto hodnotách: 10^2 - 10^3 pro radium, 10^3 - 10^6 pro thorium, 10 - 10^4 pro uran a 10^4 pro polonium a olovo. Díky těmto koeficientům a průměrnému obsahu terestrálních radionuklidů v horninách a půdách lze stanovit rozsah aktivit jednotlivých radionuklidů ve vodě na 1 až 100 $\text{mBq}\cdot\text{l}^{-1}$. Výjimku tvoří radon. Objemové aktivity radonu ve vodě jsou srovnatelné s objemovými aktivitami radonu v pórech hornin a půd, pohybují se tedy v rozmezí 10 až 1000 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$. Celkový přehled průměrných světových objemových aktivit jednotlivých významnějších radionuklidů ve vodě je uveden v přílohách, tabulka

12. Přehled hodnot naměřených v České republice je uveden v příloze, tabulka 13. V porovnání s aktivitami podzemních vod jsou aktivity vod povrchových až o několik řádů nižší. Výjimku tvoří pouze případy, kdy je vyšších hodnot v povrchových vodách dosahováno činností člověka (např.: uranový průmysl). Vysoké hodnoty mohou být ovšem naměřeny v sedimentech povrchových vodních toků. Díky fyzikálním procesům se mohou radionuklidy kumulovat v sedimentech. Následné aktivity v těchto sedimentech se mohou pohybovat od 100 do 10000 Bq.kg⁻¹. (4; 20)

Do ovzduší se dostávají terestrální radionuklidy uvolněním z hornin a půd. Jedná se především o plynný radon a jeho rozpadové produkty. Dále se do ovzduší dostávají další radionuklidy v podobě prachu. Z půd a hornin uniká radon do atmosféry difúzí, kde se rozptyluje. Průměrná objemová aktivita radonu v přízemní vrstvy atmosféry je 5 až 10 Bq.m⁻³. Radon se atmosféře přeměňuje na další radionuklidy (dlouhodobé a krátkodobé). Ty mohou buď přetrvávat v atmosféře, nebo se mohou usazovat na povrchu předmětů. Krátkodobé produkty přeměny radonu (²¹⁸Po, ²¹⁴Bi, ²¹⁴Pb) dosahují objemových aktivit v jednotkách Bq.m⁻³ (asi 80 % aktivity samotného radonu). Dlouhodobé produkty přeměny radonu (²¹⁰Pb, ²¹⁰Po) dosahují mnohem nižších objemových aktivit a to v rozmezí 0,1 až 0,5 mBq.m⁻³. Roční efektivní dávka způsobená radonem a jeho produkty přeměny činí při 2000 hodinách strávených mimo budovy 0,1mSv. Koncentrace radonu v budovách mohou být mnohonásobně vyšší. Tato problematika je rozebrána v kapitole 1.4. Objemové aktivity ostatních terestrálních radionuklidů v atmosféře (stanovené podle obsahu daných radionuklidů v horninách a půdách a průměrné prašnosti) se pohybují kolem jednotek μBq.m⁻³. Tyto průměrné celosvětové hodnoty jsou uvedeny v přílohách, tabulka 14 (4; 20).

Z litosféry, pedosféry, hydrosféry a atmosféry mohou terestrální radionuklidy pronikat i do organických materiálů, které jsou součástí potravních řetězců. U rostlin se tomu děje kořenovým přestupem z půdy (přestupové koeficienty pro uran, radium, thorium, olovo a polonium se pohybují v rozmezí 0,0001 až 0,01), přestupem z kontaminované vody a depozicí samotných radionuklidů na povrchu rostlin. Díky známým koncentracím radionuklidů v jednotlivých složkách prostředí a přestupových koeficientech lze určit, že objemové aktivity rostlin mohou dosáhnout až desítek

mBq.kg⁻¹. Do organismů hospodářských zvířat se radionuklidy dostávají hlavně cestou ingesce kontaminovaného krmiva a vody. Průměrné hodnoty objemových aktivit v jednotlivých složkách potravních řetězců jsou uvedeny v přílohách, tabulka 15. Extrémní hodnoty objemových aktivit se dají zjistit i v rámci potravních řetězců. Jedná se například o vysoký obsah radionuklidů v tabáku, způsobený vysokou depozicí ²¹⁰Pb na listech tabáku (4; 20).

V rámci životního prostředí České republiky jsou monitorovány následující radionuklidy: v ovzduší ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁸Pu, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ⁸⁵Kr, ¹⁴C, ³H, v poživatinách ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H a v těle člověka ¹³⁷Cs. Účelem programu monitorování je sledování distribuce aktivit radionuklidů a dávek ionizujícího záření v prostoru a čase, zejména s cílem získat dlouhodobé časové trendy a včas zjistit odchylky od nich. Časový průběh průměrných měsíčních objemových aktivit ¹³⁷Cs, ⁷Be a ²¹⁰Pb ve vzdušném aerosolu a ⁸⁵Kr v ovzduší sledovaný od roku 1986 je uveden v přílohách, graf 1. Aktuální týdenní průměrné objemové aktivity ¹³⁷Cs, ⁷Be a ²¹⁰Pb v posledním roce jsou uvedeny v přílohách, graf 2. Vývoj obsahu ¹³⁷Cs v lidském organismu (průměrná aktivita 33 Bq) po černobylské havárii je uveden v přílohách, graf 3. Hmotnostní a objemová aktivita ¹³⁷Cs ve vybraných potravinách v r. 2007 je uvedena v přílohách, tabulka 16 (3).

1.3.3.2 Vnější expozice způsobená terestrálními radionuklidy

Vnější expozice je způsobena radionuklidy z prostředí (půda, horniny, vzduch, voda, biosféra), které emitují γ záření. Dávkový příkon se liší v závislosti na přírodních podmínkách a pohybuje se v rozmezí 18 – 93 nGy.h⁻¹ mimo budovy a v rozmezí 20 – 200 nGy.h⁻¹ v budovách. Existují ale i lokace kde se tento příkon může blížit 2000 nGy.h⁻¹.

Průměrná roční efektivní dávka (mimo budovy i v budovách) závisí na celkovém radiačním příkonu, poměru hodin strávených uvnitř budov a mimo ně a na konverzním faktoru absorbovaná dávka ve vzduchu / efektivní dávka. Tyto hodnoty¹⁾ činí: 84nGy.h⁻¹ (dávkový příkon v budovách), 59nGy.h⁻¹ (mimo budovy), 08:02 (poměr doby strávené v budovách a mimo budovy), 0,7Sv.Gy (konverzní faktor) a 8760 (počet hodin v roce).

$$\text{Expozice v budovách: } 84\text{nGy.h}^{-1} \times 8760\text{h} \times 0,8 \times 0,7\text{Sv.Gy} = 0,41\text{mSv}$$

Expozice mimo budovy: $59\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1} \times 8760\text{h} \times 0,2 \times 0,7\text{Sv}\cdot\text{Gy} = 0,07\text{mSv}$

Celosvětová průměrná efektivní dávka je 0,48mSv (rozmezí v jednotlivých zemích se pohybuje od 0,3 do 0,6mSv za rok). Pro děti je tato hodnota o 10 % vyšší a pro kojence o 30 % vyšší (14).

1.3.3.3 Vnitřní expozice způsobená terestrálními radionuklidy (mimo radon)

Vnitřní expozice je způsobená příjmem terestrálních radionuklidů inhalací a ingescí. Dávka způsobená inhalací je výsledkem přítomnosti prachových částic v atmosféře, které obsahují radionuklidy uran-radiové a thoriové rozpadové řady. Vzhledem k nízkému obsahu přírodních radionuklidů ve vzduchu, přispívá inhalační dávka pouze malým dílem k celkové vnitřní expozici. Průměrná prašnost je $50\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a vzhledem k obsahu terestrálních radionuklidů v půdě (přílohy, tabulka 11) pohybuje se průměrný obsah těchto radionuklidů ve vzduchu v rozmezí 1 – 500 $\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (přílohy, tabulka 14). Tato hodnota se liší v závislosti na prašnosti daného území (vyšší v hustě obydlených oblastech) a horniny, ze které prach pochází. Prach obsahuje také značné množství organických částic a v zimě také popílek ze spalování uhlí. Vzhledem k částicím pocházejícím z hornin obsahují organické částice mnohem méně přírodních radionuklidů. Naopak obsah přírodních radionuklidů v popílku může být až několiknásobně vyšší než v částicích z hornin. V přímořských lokalitách je množství přírodních radionuklidů ve vzduchu snižováno vzduchem proudícím z oceánů, který neobsahuje téměř žádné radionuklidy. Celková roční efektivní dávka způsobená inhalací (7300 m³ vzduchu za rok u dospělého člověka) přírodních radionuklidů je 6 μSv . Hodnoty pro jednotlivé významnější přírodní radionuklidy jsou uvedeny v přílohách, tabulka 17 (4; 14).

Dávka způsobená ingescí je způsobená přítomností ⁴⁰K a opět radionuklidy uran-radiové a thoriové řady v potravinách a pitné vodě. Její velikost závisí především na množství zkonsumovaných potravin a vody a na koncentracích radionuklidů v těchto potravinách a vodě. Dospělý člověk za rok průměrně zkonsumuje 105 kg mléčných výrobků, 50 kg masných výrobků, 140 kg obilnin, 60 kg listnaté zeleniny, 170 kg kořenové zeleniny a ovoce, 15 kg ryb a 500 litrů vody. Tyto údaje se ovšem velmi liší

v závislosti na bohatosti a rozvinutosti země, přírodních podmínkách, kulturních tradicích a podobně. Koncentrace radionuklidů v potravinách a vodě závisí především na druhu půdy, klimatu a dalších převažujících zemědělských podmínkách. Průměrné hodnoty koncentrací radionuklidů v potravinách jsou uvedeny v tabulce 13. Stanovení průměrného obsahu přírodních radionuklidů v potravinách a dávky, kterou od nich člověk obdrží, je velmi obtížné. Průměrné koncentrace například ^{210}Po v mořských živočiších jsou tyto: 2400 mBq.kg^{-1} v rybách, 6000 mBq.kg^{-1} v koryšících a $15000 \text{ mBq.kg}^{-1}$ v měkkýších. Konzumace mořských živočichů se ovšem velmi liší stát od státu, dokonce i mezi samotnými jedinci. Kdyby průměrná spotřeba byla 13 kg ryb, 1 kg měkkýšů a 1 kg koryšů byl by roční příjem ^{210}Po 52 Bq. Toto číslo by platilo pouze v případě konzumace jenom čerstvých mořských živočichů. Pokud budeme brát v potaz zpracovatelské (konzervace, uzení, zmrazení) a distribuční prodlevy (93 dní) 40 % ^{210}Po by se již stačilo rozpadnout. Roční příjem by pak činil 31 Bq za rok. Velké rozdíly v aktivitách mohou být i ve vodách (kumulace radionuklidů uran-radiové řady ve studních). Na těchto případech je jasné, že průměrné hodnoty u potravin je nutno brát pouze orientačně a ne jako směrodatné hodnoty. Celkové hodnoty přírodních radionuklidů přijatých v potravě a vodě jsou uvedeny v tabulce 18. Průměrná roční efektivní dávka způsobená těmito radionuklidy je $140 \mu\text{Sv}$. Hodnoty pro jednotlivé radionuklidy jsou uvedeny v přílohách, také tabulka 18 (4; 14).

1.3.3.4 Expozice způsobená ^{40}K

Draslík je prvek nepostradatelný pro lidský organismus. Radioaktivní izotop ^{40}K tvoří $1,18 \cdot 10^{-4} \%$ z celkového množství všech izotopů draslíku. Hladina draslíku, a tedy i ^{40}K , v organismu je přísně homeostaticky udržována. Jeho průměrné množství v organismu je 2 gramy na každý kilogram tělesné váhy (0,18 % celkové tělesné váhy). Obvyklá hmotnostní aktivita ^{40}K v lidském organismu je 60 Bq.kg^{-1} . Roční efektivní dávka způsobená ^{40}K činí $0,17 \mu\text{Sv}$. Distribuce draslíku ve vybraných tkáních a orgánech a absorbovaná dávka jsou uvedeny v přílohách, tabulka 19 (14).

1.3.3.5 Expozice způsobená terestrálními radionuklidy deponovanými v organismu

Určitě množství radionuklidů, které lidský organismus přijme, se v něm může deponovat. Množství deponovaného radionuklidu závisí především na velikosti jeho příjmu a chování tohoto radionuklidu v lidském organismu. Vzhledem k velmi nízkým koncentracím radionuklidů thoriové a uran-radiové řady v organismu a variabilitě těchto koncentrací s věkem a geografickým prostředím, je stanovení průměrných koncentrací velmi obtížné (14).

Průměrné hodnoty těchto koncentrací (včetně rozsahu) ve vybraných tkáních (plíce, játra, ledviny, kost, svaly a ostatní) jsou uvedeny v přílohách, tabulka 20. Celoroční efektivní dávka způsobená těmito radionuklidy činí 120 μSv a je uvedena v přílohách, tabulka 21 (14).

1.4 Radon a jeho rozpadové produkty

Zkráceným názvem radon je většinou myšlen izotop ^{222}Rn . Tento radionuklid se přirozeně vyskytuje v životním prostředí a společně se svými krátkodobými rozpadovými produkty se může podílet až 50 % na celkové radiační zátěži. Druhým významnějším izotopem radonu je ^{220}Rn . Tento izotop je také znám pod názvem thoron (nachází se v thoriové rozpadové řadě). Radiační zátěž ^{220}Rn je v porovnání s ^{222}Rn řádově nižší (7; 14).

Ve volné atmosféře se koncentrace radonu pohybuje v rozmezí 5–10 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, proto není možné dosáhnout nižších hodnot v obytných prostorách. Při průměrných 2000 hodinách ročně strávených mimo budovy by tato koncentrace vedla k efektivní dávce 0,1 mSv. Průměrná koncentrace radonu v budovách je 56 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Existují ale i místa kde se tato koncentrace může blížit až 10 000 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. Tyto extrémní hodnoty by potom odpovídali roční efektivní dávce až 500 mSv (7; 14).

Poločas rozpadu ^{222}Rn je 3,824 dne. Příčinou zdravotních účinků není vdechování radonu (vydýchán zpět), ale vdechování jeho krátkodobých rozpadových produktů. Mezi tyto rozpadové produkty patří ^{218}Po (poločas rozpadu 3,05 minuty), ^{214}Pb (26,8 minuty), ^{214}Bi (19,9 minuty) a ^{214}Po (164 μs). Všechny tyto radionuklidy jsou kovy,

kteře se v atmosféře usazují na povrchu prachových částic. Společně s nimi jsou pak vdechovány a podle velikosti se mohou deponovat v různých částech na výstelce dýchacích cest nebo plic. Vzhledem k vysoké toxicitě α částic jsou nejškodlivější oba izotopy polonia, které se rozpadají tímto způsobem (7; 14).

Thoron se ve srovnání s radonem poměrně krátkým poločasem rozpadu (55,6 sekundy) rozpadá na α zářič ^{216}Po , který díky velmi krátkému poločasu rozpadu (0,145 sekundy) nepřispívá významně k ozáření. Významnější je až další rozpadový produkt ^{212}Pb (10,64 hodiny), který se deponuje na povrch prachových částic a společně s nimi se dostává do prostředí. Poté se mění na α zářič ^{212}Bi (60,55 minuty), který je hlavní příčinou zdravotních účinků thoronu a jeho rozpadových produktů (7; 14).

1.4.1 Zdroje radonu v atmosféře

^{222}Rn a ^{220}Rn jsou plynné radioaktivní produkty rozpadu izotopů ^{226}Ra a ^{224}Ra , které se nachází kdekoli v životním prostředí. Z pevných materiálů se radon uvolňuje pomocí zpětného odrazu při rozpadu radia. Při rozpadu radium emituje náhodným směrem α částici ($E=5,49$ MeV) a opačným směrem atom radonu ($E=0,1$ MeV). Energie zpětného odrazu stačí u ^{222}Rn k překonání vzdálenosti 20 – 70 nm v pevných materiálech, 100nm ve vodě a 63 μm ve vzduchu. Pokud je vzdálenost atomu radonu, který je zachycen v krystalické mřížce minerálů, od volného prostoru menší než vzdálenost, kterou je schopen urazit pomocí zpětného odrazu, dochází k jeho uvolnění do systému pórů v horninách nebo půdě. Emanční koeficient udává, kolik radonu se uvolní a kolik ho v materiálu zůstává. Pohybuje se v rozmezí 5 – 70 %. Emanční koeficient závisí především na velikosti a tvaru částic (menší částice a méně pravidelné částice mají větší povrch, který umožňuje vyšší únik radonu), umístění radia v částicích (radium na povrchu a v dosahu povrchu vzhledem k zpětnému odrazu). Radium se také oproti mateřským radionuklidům mnohem rychleji dostává do vegetace a uvolňování z organických půdních částic je mnohem efektivnější než z minerálních půdních částic. Vyšší vlhkost podporuje únik radonu. Půdní vlhkost ve formě tenkého filmu vody pokrývající půdní částice dokáže zachytit atomy radonu uvolněné zpětným odrazem a zabránit tak jejich opětovnému usazení na sousedních půdních částicích. Při 30 – 40%

saturaci půdy vodou je pravděpodobnost opětovného usazení částic radonu téměř nulová. Rozdělení radonu mezi plynnou a vodní fázi závisí na relativním množství vody v půdních pórech a teplotě (rozpuštění radonu ve vodě je nepřímo úměrná teplotě). Ostwaldův koeficient rozpustnosti radonu ve vodě (konc. radonu ve vodě/konc. radonu ve vzduchu) se pohybuje mezi 0,53 při 0°C a 0,23 při 25°C. V půdních pórech se radon poté šíří difúzí a může se uvolňovat do atmosféry. Plošná exhalace radonu z půd a hornin do atmosféry je 10 až 20 mBq.m⁻².s⁻¹. Exhalace závisí především na obsahu radia v podloží a nadloží a na propustnosti půdy. Obecně žuly obsahují nejvíce radia, usazené a přeměněné horniny méně a čedič a vápenec nejméně (existují ale i výjimky). V místech s vysokým obsahem radia v zemi může být tato exhalace až o dva řády vyšší. Mapa očekávaného radonového rizika v České republice je zachycena v přílohách, obrázek 1 (4; 7; 14).

Koncentrace thoronu v půdním vzduchu je srovnatelná s radonem, díky podobné produkci a podobnému chování thoronu v zemi. Naopak plošná exhalace thoronu z půdy je oproti radonu několikanásobně nižší. Tento fakt je způsoben velmi krátkým poločasem rozpadu thoronu (55,6 sekundy). Většina thoronu se tedy rozpadne dřív než se difúzí dostane z půdního vzduchu do atmosféry. Lokálně mohou být koncentrace radonu a thoronu v ovzduší ovlivněny vzdušným prouděním (4; 7; 14).

1.4.2 Zdroje radonu v budovách

Významnými zdroji radonu v budovách jsou geologické podloží, použitý stavební materiál, používaná voda, venkovní vzduch a případně používaný zemní plyn (4; 7; 14).

Nejvýznamnějším zdrojem je radon z geologického podloží domu a to především obsah radonu v půdním vzduchu, který průměrně činí 50 000 Bq.m⁻³ (v závislosti na faktorech zmíněných v předcházející kapitole se může pohybovat od 1000 do 1 000 000 Bq.m⁻³). Mimo obsahu radonu v půdním vzduchu závisí riziko daného místa také na propustnosti základové vrstvy pro plyny. K vyjádření tohoto rizika se používají tzv. kategorie radonového rizika základových půd, které jsou uvedeny v přílohách, tabulka 22. Toto riziko se ovšem neprojeví, pokud je budova vůči podloží dobře izolována. Z této podmínky vyplývá, že problémem radonu trpí hlavně starší budovy (4; 7; 14).

Radon se do budov obvykle dostává dvěma způsoby. První je difúze, což je transport hmoty z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací. Pokud je budova dobře izolována, může se do ní radon z půdního vzduchu dostat pouze tímto způsobem (difúze přes protiradonovou těsnící fólii) a nedochází proto k významnému nárůstu jeho koncentrace v budově (4; 7; 14).

Druhým způsobem je konvekce, což je transport hmoty prouděním z míst s vyšším tlakem do míst s nižším tlakem. Tento způsob průniku radonu do budov se uplatňuje hlavně při porušené izolaci (trhliny v izolační fólii) nebo absenci jakékoliv protiradonové bariéry (podlahy z udusané hlíny). Konvekce je způsobena podtlakem v budově, který se vytvořil díky rozdílným teplotám vně a uvnitř budovy. Konvekce je tedy nejsilnější v topné sezoně, kdy ohřátý vzduch uniká horními částmi budov a současně je nasáván studený venkovní vzduch a půdní vzduch (4; 7; 14).

Druhým důležitým zdrojem radonu v budovách je použitý stavební materiál. Stavební materiál obsahuje přibližně tolik radionuklidů, kolik jich bylo obsaženo v použitých surovinách. Průměrné hmotnostní aktivity v nejčastěji používaných stavebních materiálech jsou uvedeny v přílohách, tabulka 23. Princip uvolňování radonu z pevné fáze do pórů ve stavebním materiálu je stejný jako v případě půd a hornin. Objemové aktivity v pórech stavebních materiálů jsou srovnatelné s aktivitami v půdním vzduchu. Do vnitřního ovzduší budovy se radon dostává difúzí. Radon, který ze stavebního materiálu neunikl, se v něm rozpadne a jeho produkty (stejně jako ^{40}K a jiné obsažené radionuklidy) jsou zdrojem gama záření ze stěn (4; 7; 14).

Radon, který je obsažen ve vodě se při používání velkého množství vody (sprchování, praní) uvolňuje do ovzduší a je tak zdrojem inhalační expozice. Při požití radonem kontaminované vody je zdrojem ingesční expozice. Množství uvolněného radonu závisí především na koncentraci radonu ve vodě, na spotřebě vody a na množství osob v budově. Po uvolnění radonu dochází k jeho rovnoměrnému rozptýlu po budově (4; 7; 14).

1.4.3 Efektivní dávka způsobená radonem

Roční efektivní dávka způsobená radonem pouze z atmosféry nebo půdního vzduchu se dá stanovit na základě průměrné objemové aktivity radonu ve vzduchu ($10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ mimo budovy a $40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ v budovách), faktoru nerovnováhy (0,4 mimo budovy a 0,6 v budovách), počtu hodin strávených uvnitř a vně budov a dávkového koeficientu ($9 \text{ nSv} (\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$).

$$\text{V budovách: } 40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3} \times 0,4 \times 7000 \text{ h} \times 9 \text{ nSv} (\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} = 1 \text{ mSv}$$

$$\text{Mimo budovy: } 10 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3} \times 0,6 \times 1760 \text{ h} \times 9 \text{ nSv} (\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} = 0,095 \text{ mSv} \quad (14)$$

Pro thoron je efektivní dávka následující:

$$\text{V budovách: } 0,3 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3} (\text{EEC}) \times 7000 \text{ h} \times 40 \text{ nSv} (\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} = 0,084 \text{ mSv}$$

$$\text{Mimo budovy: } 0,1 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3} (\text{EEC}) \times 1760 \text{ h} \times 40 \text{ nSv} (\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})^{-1} = 0,007 \text{ mSv} \quad (14)$$

Při stanovení celkové efektivní dávky je dále nutno počítat s radonem a thoronem uvolněných ze stavebního materiálu. „Pro případ stavby z betonu s hmotnostní aktivitou radia $34 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, zdmi tloušťky 0,4 m, hustoty $1600 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ a difúzní délky radonu v betonu 0,18 m se dá rychlost přísunu radonu ze zdí v běžné místnosti odhadnout na $750 \text{ Bq}\cdot\text{h}^{-1}$. To vede při ventilaci $0,3 \text{ h}^{-1}$ k průměrné ekvivalentní objemové aktivitě $17 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ a tedy k odhadu roční efektivní dávky $0,7 \text{ mSv}$.“ (4)

Významný podíl na celkové efektivní dávce má také radon z používané vody. Obecně platí, „že průměrná objemová aktivita radonu ve vzduchu je desettisíckrát menší než objemová aktivita radonu v používané vodě. Například při hodnotě $300 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ radonu ve vodě (tedy $3 \cdot 10^5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, což je mezní hodnota, nad kterou nesmí být voda dodávána do veřejných vodovodů) vychází průměrná objemová aktivita radonu ve vzduchu $30 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, což vede k ročnímu příjmu inhalací 80 kBq (ekv) a při konverzním koeficientu $5,1 \text{ nSv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ (ekv) k roční efektivní dávce $0,4 \text{ mSv}$.“ (4)

Vzhledem k různým faktorům ovlivňující koncentrace radonu a individuálních podmínek každého objektu, je stanovení průměrné celoroční efektivní dávky a její interpretace pro více objektů problematické z důvodu velkého rozptylu možných hodnot. Průměrná celosvětová roční efektivní dávka způsobená radonem a thoronem je $1,25 \text{ mSv}$, v česku je odhadována na více než 2 mSv ročně (4).

1.5 Přírodní radionuklidy uvolňované do životního prostředí průmyslovou činností člověka

Existuje mnoho případů, ve kterých člověk získává, zpracovává, transportuje nebo používá suroviny, které obsahují přírodní radionuklidy. Následné emise těchto radionuklidů, které by se bez zásahu člověka významně neuvolňovali, do ovzduší nebo vod vedou k případnému vnějšímu i vnitřnímu ozáření člověka. Relativní velikost prachových částic omezuje jejich šíření do okolí, kritickou skupinou lidí jsou tedy zaměstnanci daného průmyslového objektu, popřípadě obyvatelé žijící v jeho těsné blízkosti. Do větších vzdáleností se šíří pouze radionuklidy uvolněné při termálních procesech (spalování uhlí). Mezi průmyslové činnosti uvolňující významnější množství přírodních radionuklidů patří následující: zpracování fosfátů, zpracování kovů, těžba uranu, využívání zirkoniových písků, výroba titanových pigmentů, spalování fosilních paliv, těžba a zpracování ropy a zemního plynu, těžba thoria a zpracování šrotu (radionuklidy deponované ve starém potrubí). Koncentrace radionuklidů v surovinách a odpadech těchto průmyslů jsou uvedeny v přílohách, tabulka 24, množství uvolněných radionuklidů do vzduchu a vod pak v přílohách, tabulky 25 a 26. Celková efektivní dávka může u zaměstnanců daných průmyslových objektů dosahovat 100 μSv (výjimečně za specifických podmínek až 1 mSv), mnohem běžněji se ale pohybuje v rozmezí 1 – 10 μSv . Hodnoty pro jednotlivá odvětví průmyslu jsou uvedeny v přílohách, tabulka 27 (14).

1.6 Radionuklidy pocházející z testování nebo použití jaderných zbraní

Testováním jaderných zbraní v atmosféře mezi lety 1945 až 1980 se do životního prostředí uvolnil největší podíl z celkového množství všech antropogenních radionuklidů. Podzemní testy probíhaly až do roku 1998, ale ve srovnání s atmosférickými je množství radionuklidů uvolněných do prostředí významně nižší a zasažené území má lokální nebo regionální charakter. Celkem bylo provedeno 2 419 (543 atmosférických, 1876 podzemních) testů o výkonu 530 Mt (440 Mt atmosférické, 90 Mt podzemní) ekvivalentu TNT. Testováním byla více zasažena severní polokoule. Tento fakt byl

způsoben vyšším počtem testů na severní polokouli a povahou vzdušných proudů (pasáty), díky kterým nedošlo k včasnému promíchání atmosféry tak, aby radioaktivní spad byl na Zemi rovnoměrný. Spektrum radionuklidů, které vznikají při výbuchu jaderných zbraní je poměrně široké. Zahrnuje především samotné štěpné produkty jaderné reakce, dále může zahrnovat zbytky nevybuchlé nálože a radionuklidy vzniklé z prvků prostředí aktivací neutrony. Nejvýznamější radionuklidy vyprodukované a globálně rozptýlené při atmosférických testech jsou uvedeny v přílohách, tabulka 28. Celosvětové průměrné roční efektivní dávky způsobené externí expozicí pro jednotlivé radionuklidy jsou uvedeny v přílohách, tabulka 29. Dávky způsobené ingescí jsou uvedeny také v přílohách, tabulka 30 a dávky způsobené inhalací též v přílohách, tabulka 31. Z hlediska současné přítomnosti v prostředí jsou nejdůležitější radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu, především ^{90}Sr , ^{137}Cs a ^{14}C . Součet průměrných ročních efektivních dávek pro severní i jižní polokouli ve vybraných časových obdobích jsou uvedeny v následujících tabulkách (14).

Tabulka 1.6 a – průměrné roční efektivní dávky na severní polokouli

Časové období	Průměrné roční efektivní dávky (μSv)			
	externí ozáření	ingesce ^a	inhalace	celkem
1945-1999	382	531	164	1076
2000-2099	124	141	---	264
2100-2199	12	51	---	63
2200- ∞	1,4	2180	---	2181

a – zahrnuje dávku z globálně rozptýlených ^3H a ^{14}C

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 1.6 b – průměrné roční efektivní dávky na jižní polokouli

Časové období	Průměrné roční efektivní dávky (μSv)			
	externí ozáření	ingesce ^a	inhalace	celkem
1945-1999	115	178	35	328
2000-2099	31	126	---	157
2100-2199	3,1	50	---	53
2200- ∞	0,3	2180	---	2180

a – zahrnuje dávku z globálně rozptýlených ^3H a ^{14}C

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

1.7 Radionuklidy pocházející z jaderně energetického cyklu

Již při těžbě a zpracování uranové rudy se uvolňuje do prostředí významné množství radionuklidů. Jedná se hlavně o radionuklidy rozpadových řad, které se ale díky velikosti prachových částic nešíří příliš z místa produkce, a ^{222}Rn , který se již může šířit do vzdálenějších míst. Na jednu tunu vytěženého uranové rudy se průměrně uvolní 300 GBq radonu, při zpracování rudy pak dalších 13 GBq na tunu (4; 14).

Další radionuklidy vznikají při provozu jaderných reaktorů a některé z nich jsou posléze vypouštěny do životního prostředí. Množství a radioaktivní produkty se mohou mírně lišit podle druhu reaktoru, typu paliva a stupně vyhoření paliva. Radionuklidy vznikající v reaktorech se dají rozdělit na štěpné produkty (vznik štěpením paliva) a aktivační produkty (vznik aktivací neutrony v obalu paliva, konstrukci reaktoru atd.). Do primárního chladiva se radionuklidy dostávají netěsnostmi v palivu a v pokrytí paliva, korozi konstrukcí reaktoru a aktivací samotného chladiva a jsou zdrojem pro vnější i vnitřní ozáření zaměstnanců. Radionuklidy uniklé z paliva a primárního okruhu (netěsnosti, údržba, výměna a kontrola chladicí vody) se dostávají do výpustí a jsou zdrojem kontaminace prostředí a ozáření obyvatelstva (4; 14).

Do ovzduší jsou uvolňovány hlavně radioaktivní vzácné plyny. Díky tomu, že většina těchto plynů má velmi krátké poločasy rozpadu, rozpadají se dříve, než mohou uniknout z primárního okruhu. Ty s delšími poločasy rozpadu jsou vedeny přes filtry a zpoždovací linky, kde dochází k poklesu aktivity, do výpustí. Mezi nejvýznamnější radionuklidy uváděnými do prostředí plynnými výpusťmi patří ^{41}Ar , ^3H , ^{14}C a radioizotopy jódu (4; 14).

^{41}Ar tvoří významnou část plynných výpustí. Vzniká reakcí (n, γ) na ^{40}Ar , který je součástí atmosféry a do primárního okruhu se dostává jako nečistota dusíku, kterým se tlakuje voda (4; 14).

Nejvíce tritia vzniká ternárním štěpením jaderného paliva, ale pouze 1 % se netěsnostmi v palivu dostane do primárního okruhu. U tlakovodních reaktorů vzniká tritium aktivací boru, který je obsažen v kontrolních tyčích a v chladivu (kys. boritá), kde jeho koncentrace pomáhá regulovat štěpení. V reaktorech chlazených plynem vzniká aktivací lithia, které je přítomno jako nečistota grafitu. Pokud je v reaktoru

použito jako moderátoru a chladiva těžké vody, vzniká tritium aktivací deuteria. V tomto případě je velké množství tritia ve výpustích vážným problémem.

^{14}C vzniká ternárním štěpením jaderného paliva, reakcí (n, α) na ^{17}O v palivu i moderátoru i reakcí (n, p) na ^{14}N v palivu a primárním okruhu (4).

Radioizotopy jódu vznikají štěpením jaderného paliva. Jedná se hlavně o ^{129}I , ^{131}I , ^{132}I , ^{132}I , ^{133}I a ^{134}I . Nebezpečnost jódu vyplývá především z jeho schopnosti vychytávat se ve štítné žláze. ^{129}I má velmi dlouhý poločas rozpadu ($1,6 \cdot 10^7$ let) a společně s ^3H , ^{14}C a ^{85}Kr (dlouhé poločasy rozpadu, snadno globálně rozptýlitelné, vzniklé činností člověka) tvoří tzv. globální kolektivní dávku (4).

Ve formě aerosolů, které se vytváří při údržbě, opravách nebo únicích netěsnostmi primárního okruhu, se uvolňuje široké spektrum radionuklidů. Jedná se především o ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{76}As , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{124}Sb , ^{125}Sb , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{181}Hf , ^{182}Ta (4; 14).

Zdroje radionuklidů vypouštěných do vodotečí jdou stejné jako u radionuklidů vypouštěných do ovzduší. Jedná se především o tritium a některé další radionuklidy (4).

Radionuklidy uvolňované JE Dukovany, JE Temelín a ÚJV Řež jsou uvedeny v přílohách, tabulky 32 až 36. Z celkové roční efektivní dávky, kterou člověk obdrží, činí tyto radionuklidy pouze 0,04 % (5; 8).

1.8 Radionuklidy uvolněné do prostředí haváriemi a nehodami

Méně významné jsou nehody, které mají pouze lokální charakter. Může se jednat například o ztrátu defektoskopu, hloubkoměru nebo ozařovače, např. neodborné vyjmutí cesiového zářiče ^{137}Cs o aktivitě 50 000 GBq z radioterapeutického ozařovače a jeho následné prodání do šrotu v brazilském městě Goiania (2).

Podstatně větší význam mají nehody, které zasáhly větší území (např.: havárie JE Three Mile Island). Z hlediska Evropy a České republiky byla takovouto událostí havárie Černobylské jaderné elektrárny. Při hodnocení dlouhodobých následků této havárie byl sledován obsah ^{137}Cs v ovzduší (aerosoly a spady), v potravních řetězcích a v lidském těle u vybraných skupin populace. Obsah ^{137}Cs v roce 2006 byl u mnoha vzorků z životního prostředí pod mezí detekovatelnosti. Z celkové roční efektivní

dávky, kterou člověk obdrží, činí radionuklidy uvolněné touto havárií pouze 0,3 % (5; 8).

2 Cíle práce a hypotézy

Cíle práce:

- 1) Vytvořit přehled umělých radionuklidů, které se uvolnily a uvolňují do životního prostředí činností člověka.
- 2) Zjištění stupně informovanosti obyvatelstva o těchto radionuklidech.
- 3) V případě zjištění nedostatečné informovanosti využití této práce k jejímu zlepšení.

Hypotéza:

Radiační zátěž z umělých radionuklidů je v České republice menší než z radionuklidů přírodních.

3 Metodika

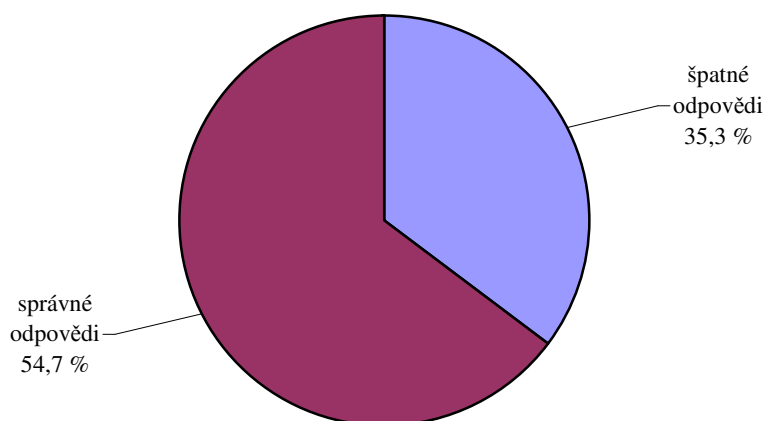
Dané téma jsem zpracoval pomocí dostupných literárních zdrojů (tištěná i elektronická podoba), jak v českém, tak především v anglickém jazyce. Dále pomocí internetových zdrojů, a to především institucí, které se v rámci České republiky danou problematikou zabývají. Jedná se především o Státní úřad pro jadernou bezpečnost a Státní ústav radiální ochrany. K zjištění informovanosti obyvatel České republiky o této problematice jsem využil formu dotazníkové akce. Celkem jsem rozdál 100 dotazníků (v Českých Budějovicích, Domažlicích, Plzni) z nichž se vrátilo 85 (návratnost tedy činí 85 %). Dotazník se skládal z 10 otázek, z čehož u 8 byla správná 1 odpověď, u jedné otázky 2 odpovědi a u jedné otázky byly všechny odpovědi správné. Věk respondentů se pohyboval v rozmezí 16 až 80 let.

4 Výsledky

V této části budou uvedeny všechny otázky z dotazníku společně s možnými odpověďmi (správná odpověď bude zvýrazněna tučným písmem). Výsledkem vyhodnocení každé otázky bude graf, kde bude procentuelně uvedeno, kolik respondentů odpovědělo na danou otázku dobře a kolik špatně a slovní komentář s doplňujícími informacemi ke každé otázce.

Otázka č. 1: Ionizující záření, které nejvíce proniká hmotou je:

- a) záření α
- b) záření β
- c) záření γ**



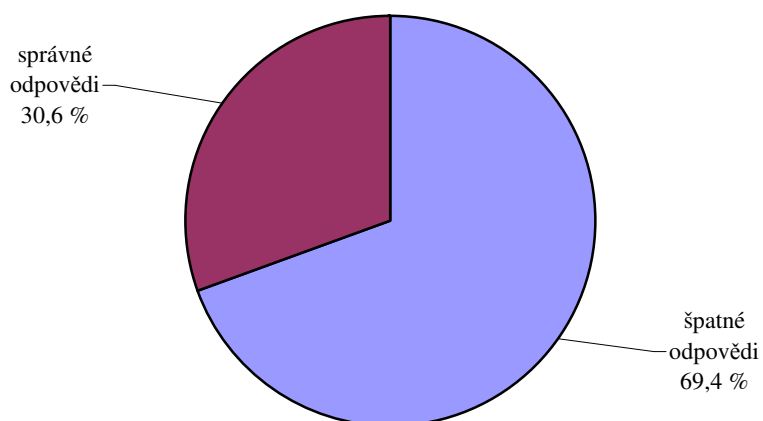
Správnou odpověď zaškrtnulo 55 respondentů, špatné odpovědi zaškrtnulo 30 respondentů. 18 respondentů (21,2 %) zaškrtnulo špatnou odpověď *a*. 12 respondentů (14,1 %) zaškrtnulo špatnou odpověď *b*.

Otázka č. 2: Z hlediska účinků na lidský organismus je pro člověka nejnebezpečnější:

a) záření α

b) záření β

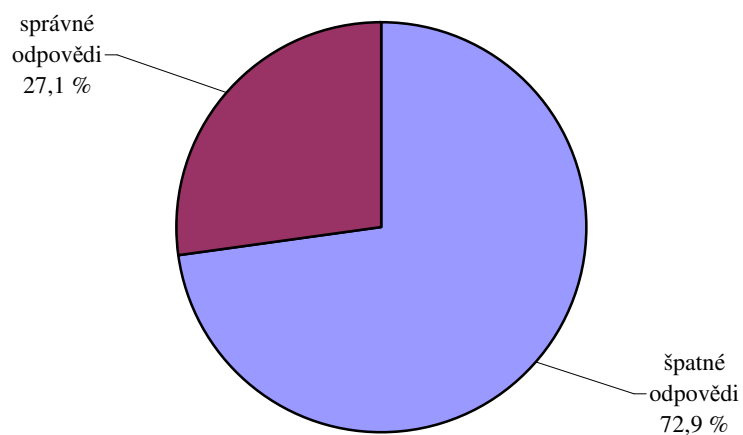
c) záření γ



Správnou odpověď zaškrtnulo 26 respondentů, špatné odpovědi zaškrtnulo 59 respondentů. 23 respondentů (27,1 %) zaškrtnulo špatnou odpověď *b*. 36 respondentů (42,3 %) zaškrtnulo špatnou odpověď *c*.

Otázka č. 3: Přírodní radionuklidy:

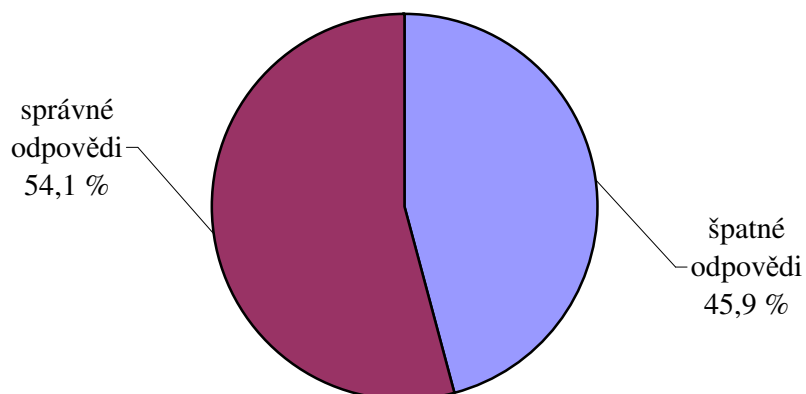
- a) vznikly při utváření vesmíru a jejich koncentrace v prostředí je neměnná
- b) nové vznikají pouze v rámci rozpadových řad
- c) nové vznikají i mimo rozpadové řady**



Správnou odpověď zaškrtno 23 respondentů, špatné odpovědi zaškrtno 62 respondentů. 35 respondentů (41,2 %) zaškrtno špatnou odpověď *b*. 27 respondentů (31,7 %) zaškrtno špatnou odpověď *a*.

Otázka č. 4: Největší podíl z celkové efektivní dávky, kterou lidský organismus za rok obdrží, tvoří:

- a) **přírodní radionuklidy**
- b) lékařská vyšetření
- c) radionuklidy uvolňované do prostředí činností člověka



Správnou odpověď zaškrtno 46 respondentů, špatné odpovědi zaškrtno 39 respondentů. 20 respondentů (23,5 %) zaškrtno špatnou odpověď *b*. 19 respondentů (22,4 %) zaškrtno špatnou odpověď *c*.

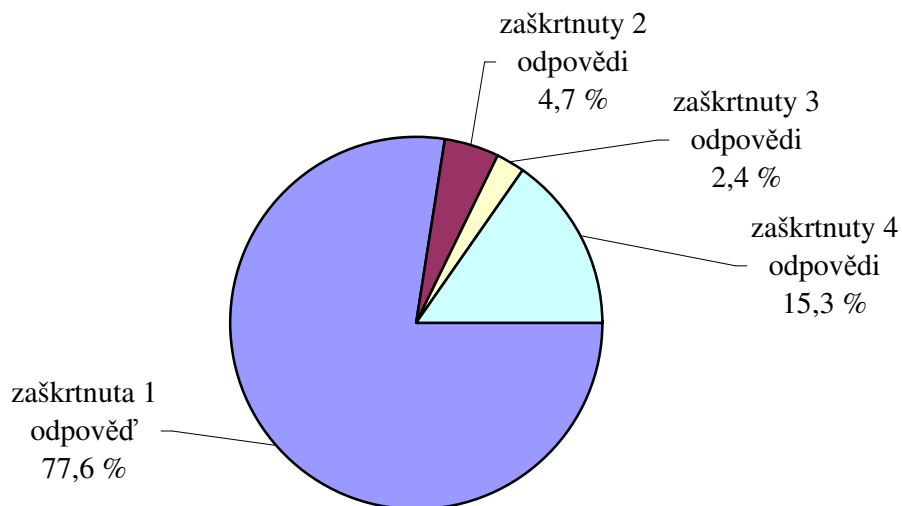
Otázka č. 5: Přírodní radionuklidy se nacházejí:

a) v horninách, půdách

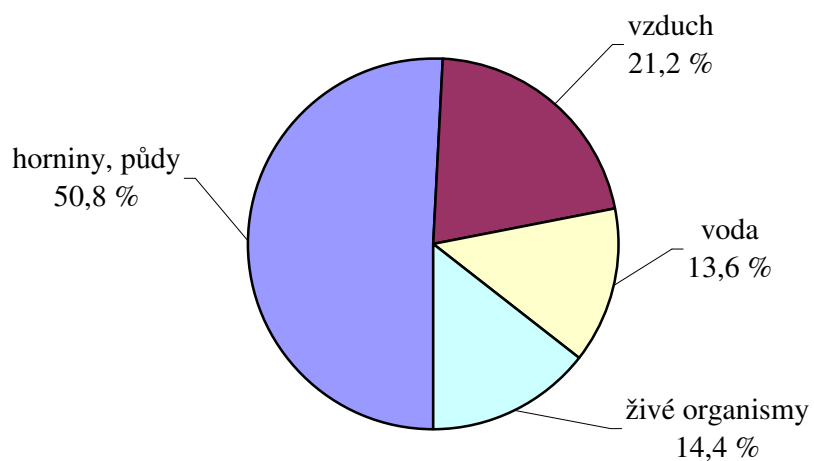
b) ve vzduchu

c) ve vodách

d) v živých organismech

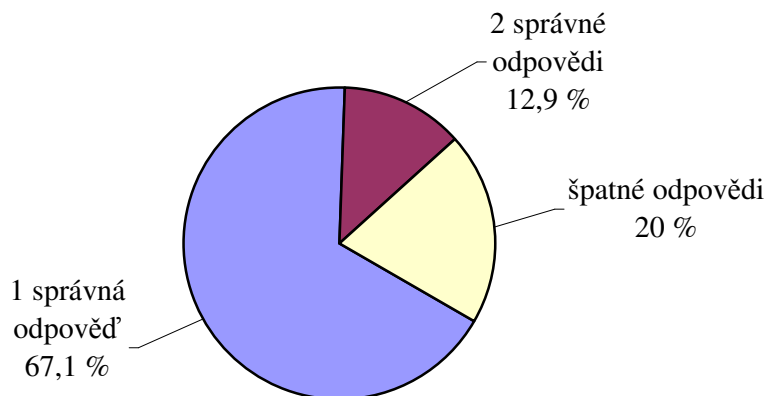


Na dalším grafu je znázorněno, na kolika procentech dotazníků byly zaškrtnuty jednotlivé odpovědi.



Otázka č. 6: Koncentrace radonu v domě se dá snížit:

- a) instalací protiradonových opatření (protiradonové izolační folie)
- b) větráním
- c) topením
- d) nedá se snížit

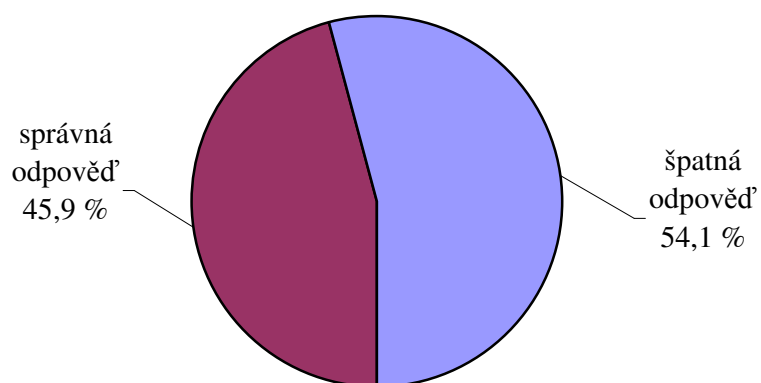


Správná možnost *a* (koncentrace radonu v domě dá snížit instalací protiradonových opatření) byla zaškrtnuta na 45 dotaznících (46,9 %). Správná možnost *b*, že se koncentrace radonu dá snížit větráním byla zaškrtnuta na 34 dotaznících (35,4 %). Špatná odpověď *c* byla zaškrtnuta na 2 dotaznících (2,1 %) a špatná odpověď *d* byla zaškrtnuta na 15 dotaznících (15,6 %).

Otázka č. 7: Průměrné množství paliva v jaderné elektrárně (typ a velikost JE Temelín)

je:

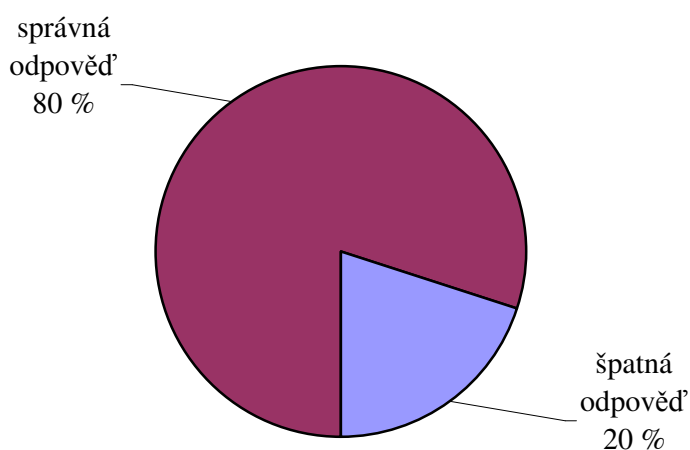
- a) 200 kilogramů
- b) 20 tun
- c) **200 tun**



Správnou odpověď zaškrtno 39 respondentů, špatné odpovědi zaškrtno 46 respondentů. 30 respondentů (35,3 %) zaškrtno špatnou odpověď *b*. 16 respondentů (18,8 %) zaškrtno špatnou odpověď *a*.

Otázka č. 8: Radionuklidy, které se dostávají do životního prostředí činností člověka, vznikají nebo se uvolňují:

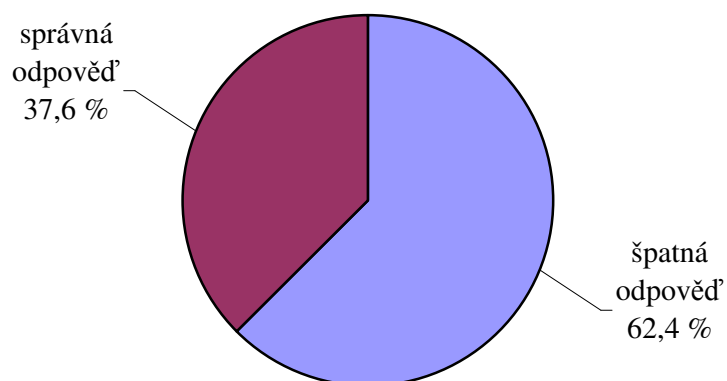
- a) pouze v jaderných reaktorech a při těžbě uranu
- b) v jaderných reaktorech, při těžbě uranu a dalších průmyslových činnostech (např.: při zpracování fosfátů, spalování fosilních paliv atd.)**
- c) do životního prostředí se činností člověka neuvolňují žádné radionuklidy



Správnou odpověď zaškrtnulo 68 respondentů, špatné odpovědi zaškrtnulo 17 respondentů. 12 respondentů (14,1 %) zaškrtnulo špatnou odpověď *a*. 5 respondentů (5,9 %) zaškrtnulo špatnou odpověď *c*.

Otázka č. 9: V současné době v České republice úložiště radioaktivního odpadu (institucionální radioaktivní odpad, nízko a středně aktivní rad. odpad, objekty kontaminované přírodními radionuklidy):

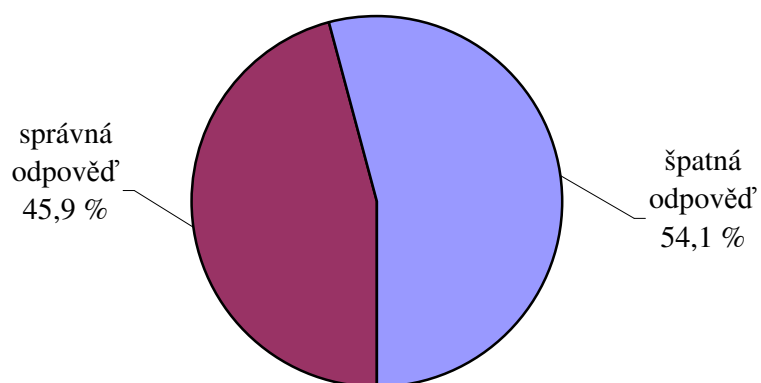
- a) nemáme
- b) máme 1
- c) máme víc jak 1**



Správnou odpověď zaškrtnulo 32 respondentů, špatné odpovědi zaškrtnulo 53 respondentů. 18 respondentů (21,2 %) zaškrtnulo špatnou odpověď *a*. 35 respondentů (41,2 %) zaškrtnulo špatnou odpověď *b*.

Otázka č. 10: V současné době v České republice máme permanentní úložiště pro vysoko aktivní vyhořelé jaderné palivo:

- a) ano
- b) ne**
- c) právě se staví



Správnou odpověď zaškrtno 39 respondentů, špatné odpovědi zaškrtno 46 respondentů. 32 respondentů (37,6 %) zaškrtno špatnou odpověď a. 14 respondentů (16,5 %) zaškrtno špatnou odpověď c.

Na 68 dotaznících byl vyplněn věk respondentů. V následujících tabulkách jsou zachyceny údaje o odpovědích jednotlivých věkových skupin. Komentář k nim je uveden v diskuzi.

Tabulka 4.1 – výsledky u věkové skupiny do 19 let

Počet správných odpovědí	Počet respondentů	Procentuální vyjádření	Průměr	Rozptyl	Odchylka
0	0	0	3,94	2,81	1,68
1	1	5,9			
2	3	17,6			
3	1	5,9			
4	8	47,0			
5	1	5,9			
6	1	5,9			
7	2	11,8			
8	0	0			
9	0	0			
10	0	0			

Tabulka 4.2 – výsledky u věkové skupiny do 26 let

Počet správných odpovědí	Počet respondentů	Procentuální vyjádření	Průměr	Rozptyl	Odchylka
0	0	0	5,91	6,72	2,59
1	1	2,9			
2	1	2,9			
3	5	14,7			
4	8	23,6			
5	3	8,8			
6	7	20,7			
7	3	8,8			
8	3	8,8			
9	2	5,9			
10	1	2,9			

Tabulka 4.3 – výsledky u věkové skupiny 26 let a výše

Počet správných odpovědí	Počet respondentů	Procentuální vyjádření	Průměr	Rozptyl	Odchylka
0	0	0	4,94	2,93	1,71
1	0	0			
2	1	5,9			
3	4	23,5			
4	1	5,9			
5	4	23,5			
6	4	23,5			
7	2	11,8			
8	1	5,9			
9	0	0			
10	0	0			

5 Diskuze

Z uvedených výsledků v předchozí části vyhodnocení dotazníků zcela jasně vyplývá, že informovanost obyvatel České republiky o dané problematice není dostatečná. Tento fakt je podle mě způsoben nezájmem o toto téma, přejímáním neověřených, nekompletních nebo účelově zkreslených informací z hromadných sdělovacích prostředků a různých ideových sdruženích, a v některých případech složitou dostupností ověřených a komplexních informací.

Pouze u pěti z osmi otázek, kde byla jedna správná odpověď ze tří možných, množství správných odpovědí překročilo významně hodnotu 33,33 % a je tedy vysoce pravděpodobné, že tohoto výsledku nebylo dosaženo pouze náhodným výběrem odpovědí.

Mimo jiné se jedná také o otázku č. 1 (ionizující záření, které nejvíce proniká hmotou je záření γ). Umět rozlišit druhy záření podle pronikavosti je důležité z hlediska ochrany před daným zářením. Pokud by se při mimořádné události donesla k obyvatelstvu neúplná (mimořádná událost by narušila i komunikační sítě) zpráva, že daná oblast je zamořena radionuklidy emitujícími záření γ , informovaní obyvatelé by věděli, že je nejdůležitější co nejrychleji opustit danou oblast, popřípadě vyhledat úkryt, který by γ záření eliminoval (stěny úkrytu z dostatečné vrstvy prvků s těžkými jádry – olovo, beton). Díky vysoké pronikavosti se γ záření využívá také v medicíně při ozařování hluboko uložených nádorů, stejně jako v průmyslu (defektoskopie materiálů).

Dále se jedná o otázku č. 4 (Největší podíl z celkové efektivní dávky, kterou lidský organismus za rok obdrží, tvoří přírodní radionuklidy). Je důležité, aby nedocházelo k podcenění vlivu přírodních radionuklidů na lidské zdraví z nevědomosti a například obyvatelé starších obytných budov si nechali změřit hladinu radonu v daném objektu. Jisté procento dezinformovanosti může být také způsobeno poměrem zpráv v médiích týkajících se přírodních radionuklidů a umělých radionuklidů nebo objektů uvolňujících umělé radionuklidy do prostředí, který je jednoznačně nakloněn druhé oblasti (např.: JE Temelín). Na druhou stranu mají přírodní radionuklidy i praktické využití v různých oborech lidské činnosti, například určování stáří předmětů (vody) pomocí ^{14}C (^3H).

Více než 33,3 % správných odpovědí bylo dosaženo také u otázky č. 7 (Průměrné množství paliva v jaderné elektrárně typu a velikosti JE Temelín je 200 tun). Ve srovnání s jadernými bombami použitými v druhé světové válce (obsahovaly přibližně 50 kilogramů štěpného materiálu) je to množství vysoké. Narozdíl od jaderných bomb a jejich účelu, je riziko nekontrolované štěpné reakce stejně jako rizika jiných možných druhů havárií minimalizováno na nejnižší možnou míru. Na druhou stranu v porovnání množství s ostatními nebezpečnými látkami (např.: čpavek, chlor, průmyslová rozplet a další), které lidstvo využívá je to množství nepatrné. Obavy lidí z jaderné energetiky pramení právě především z možnosti havárie a z radionuklidů, které jsou z jaderných elektráren vypouštěny do prostředí. Jisté množství obav ohledně jaderné energetiky a její potencionální nebezpečnosti je ve své podstatě potřebné a dobré, protože podněcují zájem o danou problematiku, stejně jako podporují časté a důkladné kontroly a popřípadě i vývoj ještě dokonalejších zabezpečovacích zařízení. Při vytváření názoru na jadernou energetiku by se lidé měli koukat na danou problematiku v širším kontextu. Elektrárny na fosilní paliva ve svém sousedství lidé taky nechtějí a zároveň se jejich zásoby prudce tenčí. Pro vybudování dostatečné kapacity pro životní prostředí šetrných elektráren (větrné, sluneční, vodní apod.) zase nejsou v České republice příhodné podmínky. Současně energetická náročnost naší společnosti neustále stoupá, její funkčnost by bez elektrické energie nebyla možná, a proto se jaderná energetika jeví jako relativně výhodná alternativa (světové zásoby uranu vystačí v současných typech jaderných reaktorů na stovky let, při použití v rychlých reaktorech na tisíce let).

80 % správných odpovědí bylo dosaženo u otázky č. 8 (Radionuklidy, které se dostávají do životního prostředí činností člověka, vznikají nebo se uvolňují v jaderných reaktorech, při těžbě uranu a dalších průmyslových činnostech, např.: při zpracování fosfátů, spalování fosilních paliv atd.). Je důležité si uvědomit že jaderná energetika spolu s těžbou a zpracováním uranu nejsou jediné průmyslové činnosti, při kterých se do prostředí uvolňují radionuklidy. Ze všech těchto průmyslových činností, s výjimkou jaderných reaktorů, se uvolňují pouze přírodní radionuklidy. Největší objem přírodních radionuklidů je obsažen v horninách, půdách a zároveň naprostá většina surovin (kovové rudy, stavební materiály, fosilní paliva atd.) pro průmyslovou činnost se

získává těžbou hornin. Právě proto je rozsah průmyslových činností, při kterých se tyto radionuklidy uvolňují tak široký. Výsledky této otázky (vysoká úspěšnost) mohou být mírně ovlivněny (negativně) formulací možných odpovědí. Správná odpověď, díky své rozsáhlosti a komplexnosti, se mnoha respondentům, kteří si nebyli jisti správnou odpovědí, zdála i nejlogičtější a proto ji vybrali. Na druhou stranu vysoká míra správných odpovědí může být způsobena zájmem lidí o tuto problematiku, i když spíše po stránce průmyslové než kvůli radionuklidům. S rostoucí poptávkou společnosti po primárních surovinových zdrojích a současnému snižování jejich zásob, se stále častěji důlní těžba přibližuje k městům, obcím. Průmyslové podniky v podstatě kvůli pracovní síle musí být také umístěny v blízkosti měst či obcí. Obyvatelé dotčených oblastí (stejně jako všichni ostatní) na jednu stranu chtějí využívat produktů těchto průmyslových činností, na druhou stranu je kvůli negativním stránkám jejich činnosti (neestetičnost, prašnost, hluk, zvýšená doprava atd.) v blízkosti svého bydliště nechtějí. Vznikají různá sdružení, která se zabývají vyhledáváním takových negativních vlastností dané průmyslové činnosti, které by její činnost (výstavbu) znemožnila. Při tomto pátrání se dozvědí i o případných uvolňovaných radionuklidech a tuto informaci dále šíří mezi obyvatelstvem. I přesto, že v daných průmyslových odvětvích jsou přijata taková opatření, která minimalizují škodlivé účinky radiace, jsou stále radionuklidy a radioaktivita vnímány jako něco, co je škodlivé v jakémkoliv množství. Přitom ve srovnání s pouze s dávkou, kterou lidé obdrží díky radonu, je dávka, způsobená radionuklidy uvolněných průmyslovou činností, zanedbatelná. Obecně u všech průmyslových činností a ještě více u těch, při kterých se do prostředí uvolňují radionuklidy, se lze setkat u lidí se zjednodušenými názorovými schémata typu „Chci využívat produktů průmyslu, ale ať tento průmysl je někde jinde.“

Poslední takovou otázkou byla otázka č. 10 (V současné době v České republice nemáme permanentní úložiště pro vysoko aktivní vyhořelé jaderné palivo). Skutečnost, že necelých 46 % respondentů odpověděla správně, je podle mě způsobená silnou medializací tohoto problému. Naprostá většina respondentů také odpověděla na mojí doplňující otázku, zda by chtěli případné hlubinné úložiště v blízkosti svého bydliště, negativně. Tento fakt je způsoben nepopiratelnou nebezpečností vysoko aktivního

vyhořelého jaderného paliva, ale také nevědomostí jak vůbec takové hlubinné úložiště funguje a jaké ochranné bariéry a po jakou dobu by zabraňovali samovolnému úniku skladovaného jaderného materiálu do prostředí. První bariérou, která by zajišťovala bezpečnost úložiště, je znehybnění radionuklidů v chemicky i mechanicky odolné chemické látce (borosilikátové sklo, keramické materiály) s dobou životnosti až jeden milion let. Druhou bariéru tvoří silnostěnný ocelový (uvažuje se i o mědi, titanu) kontejner, kam se odpad umístí. Další bariérou mohou být další betonové konstrukce, kam se sudy umístí spolu s nepropustnými nátěry, drenážními systémy apod. Poslední bariéru by tvořila samotná geologická formace, ve které by bylo úložiště umístěno, stabilní nejméně na 70 milionů let. V rámci evropské unie se také uvažuje o vybudování jednoho společného hlubinného úložiště pro všechny členské země. Otázkou tedy není jestli, ale kdy a kde bude takové úložiště vybudované. Zároveň je také možné, že s vývojem technologií se v budoucnosti najde pro dnes nevyužitelný jaderný odpad uplatnění, proto by bylo dobré navrhnout ochranné bariéry tak, aby bylo možné tento „odpad“ znovu získat.

U dalších tří z osmi otázek, kde byla jedna správná odpověď ze tří možných, se množství správných odpovědí pohybovalo kolem hodnoty 33,33 % a je tedy vysoce pravděpodobné, že tohoto výsledku bylo dosaženo pouze náhodným výběrem odpovědí.

Mimo jiné se jedná také o otázku č. 2 (Z hlediska účinků na lidský organismus je pro člověka nejnebezpečnější záření α). Nejvíce respondentů si myslelo, že nejškodlivější je záření γ . Tento výsledek vychází z logické úvahy laické společnosti, že pokud je záření γ nejpronikavější bude proto i nejnebezpečnější. V určitých situacích je tato úvaha zcela správná. Například do vnější expozice se β a α radionuklidy vůbec nezapočítávají a to z důvodu, že záření, které emitují, nepronikne vnějším prostředím nebo kůží do lidského organismu. Pokud se tedy α záření nedostane do organismu, nemůže se projevit ani jeho nebezpečnost a z hlediska vnější expozice je tedy nejnebezpečnější záření γ . Nepronikavosti α záření se dá také využít v případě evakuace území zamořeného α radionuklidy (nebo směsí obsahující je). Chování evakuovaných by mělo být v tomto případě takové, aby nedocházelo ke zviření prachu s radionuklidy a jejich následnému vdechnutí.

Dále se jedná o otázku č. 3 (Nové přírodní radionuklidy vznikají i mimo rozpadové řady). U této otázky je zajímavé hlavně to, že téměř 32 % respondentů si (špatně) myslí, že radionuklidy vznikly při utváření vesmíru a jejich koncentrace v prostředí je neměnná. Pokud by skutečně jejich koncentrace měla být neměnná, znamenalo by to popření určujících vlastností radionuklidů, schopnosti za současného vyzáření energie přeměnit se na jiný prvek. Koncentrace radionuklidů v životním prostředí musí (díky jejich radioaktivitě) neustále klesat. Díky výsledkům této otázky se lze tedy domnívat, že téměř 32 % respondentů neví co je to radionuklid.

Kolem 33,3 % správných odpovědí bylo dosaženo také u otázky č. 9. (V současné době v České republice máme víc jak 1 úložiště radioaktivního odpadu pro institucionální radioaktivní odpad, nízko a středně aktivní radioaktivní odpad a pro objekty kontaminované přírodními radionuklidy). Nízké procento správných odpovědí může být mimo jiné způsobeno faktem, že u neodborná veřejnost nerozlišuje mezi jednotlivými druhy úložišť radioaktivního odpadu. Dochází proto ke splývání s silně medializovanou možností výstavby hlubinného úložiště pro vyhořelé jaderné palivo. Respondentů, kteří věděli, že takovýto typ úložiště máme, jsem zeptal na doplňující otázky ohledně umístění těchto úložišť a druhu odpadů, který se v nich ukládá. Na tyto otázky neodpověděl dobře ani jediný respondent. V současné době jsou v České republice 4 úložiště tohoto typu, z toho 3 používané (Dukovany, Richard, Bratrství) a 1 uzavřené (Hostim u Berouna). Úložiště Dukovany leží v objektu JE Dukovany a bylo vybudováno pro zneškodnění radioaktivních odpadů vzniklých v jaderné energetice a patřících do kategorie nízko a středně aktivních odpadů (tedy ne vyhořelé jaderné palivo). V jaderné energetice vznikají dva druhy nízko a středně aktivních odpadů. Pevné odpady (kontaminované ochranné pomůcky, čisticí textilie, stavební suť atd.) a odpadní vody. Úložiště Richard se nachází nedaleko Litoměřic v komplexu bývalého vápencového dolu Richard II. Zde jsou ukládány institucionální radioaktivní odpady (ze zdravotnických zařízení, výzkumných zařízení atd.). Úložiště Bratrství se nachází v Jáchymově v komplexu bývalého uranového dolu Bratrství. Je určeno výhradně k umístění odpadů kontaminovaných přírodními radionuklidy. Odpady v těchto úložištích jsou ukládány do sudů, které jsou pozinkované a natřené asfaltovým nátěrem.

V případě potřeby jsou tyto sudy vloženy do větších a prostor mezi nimi je vyplněn betonem. Vytvoří se tak další přibližně pět centimetrů silná ochranná vrstva. Samotná úložiště jsou kromě geologického masivu chráněna dalšími inženýrskými sítěmi (drenážní systém atd.).

U otázky č. 5 (Přírodní radionuklidy se nacházejí v horninách a půdách, ve vzduchu, ve vodách, v živých organismech) byly správné všechny odpovědi. Na tento fakt nebylo v dotazníku upozorněno. Pouze u této otázky se odpovědi vzájemně nevylučovali nebo zaškrtnutí více odpovědí nevylučovalo zadání otázky. Kdyby tedy bylo na možnost čtyř správných odpovědí upozorněno, velké procento respondentů by logicky určilo, že je to u této otázky a výsledky by mohly být tímto faktem zkresleny. Zároveň bylo zajímavé sledovat, kolik respondentů logicky napadne zaškrtnout více odpovědí. Velmi často jsem se setkal s tím, že se sami zeptali, zda je u některé otázky víc správných odpovědí.

U otázky č. 6 (Koncentrace radonu v domě se dá snížit instalací protiradonových opatření a větráním) byly možné 2 správné odpovědi. Na tento fakt opět nebylo upozorněno a opět bylo zajímavé sledovat, kolik respondentů zaškrtně více odpovědí. Velmi zajímavé je, že nejlogičtější odpověď z celého dotazníku (Koncentrace radonu v domě se dá snížit instalací protiradonových opatření) byla zaškrtnuta pouze an necelých 50 % dotazníků. Tento fakt může být způsoben tím, že veřejnost neví přesně, co si pod pojmem protiradonové opatření představit (i přesto, že v dotazníku byla zmíněna izolační protiradonová fólie). U nových staveb vychází případná opatření z kategorie radonového rizika pozemku (přílohy, tabulka 22). Ochrana staveb na pozemku s nízkým radonovým rizikem nevyžaduje žádná speciální opatření. Dostatečnou ochranu tvoří běžná hydroizolace provedené v celém půdorysné ploše objektu. Také se doporučuje oddělit dveřmi podzemní podlaží od vyšších. Ochrana staveb na pozemku se středním radonovým rizikem vyžaduje provedení všech konstrukcí v přímém kontaktu se zemínou s protiradonovou izolací (zároveň i hydroizolace). Za protiradonovou izolaci se považuje kvalitní hydroizolace s dlouhou životností a se změřeným součinitelem difuze radonu, podle kterého je možno vypočítat potřebnou tloušťku této izolace pro daný objekt. Tato izolace musí být provedena

spojitě v celé ploše kontaktní konstrukce s podložím (i pod stěnami). Zároveň všechny prostupy touto izolací musí být vzduchotěsné. V případě, že v podzemních prostorách nejsou obytné místnosti, může být tato izolace nahrazena běžnou hydroizolací, pokud po celý rok bude zajištěno přirozené větrání sklepa a vstup do něj bude opatřen těsnými dveřmi s automatickým zavíráním. Ochrana staveb na pozemku s vysokým radonovým rizikem se, pokud koncentrace radonu v podloží nepřesahuje dvojnásobek koncentrace oddělující střední a vysoké riziko, se provádí stejnými opatřeními jako na pozemku se středním radonovým rizikem. Pokud tomu tak není, protiradonová izolace musí být ve všech konstrukcích v přímém kontaktu s podložím doplněna o odvětrávací drenážní systém pod objektem nebo o odvětrávanou vzduchovou mezeru pod izolací. Úkolem obou dvou systémů je snížit koncentraci radonu pod základovou deskou (nebo pod protiradonovou izolací) a vytvořit podtlak pod základovou deskou (nebo protiradonovou izolací) oprati prostorám nad ní a zabránit tak pronikání radonu. U stávajících budov je postup jiný. Před případnou instalací těchto opatření je nezbytná podrobná radonová analýza daného objektu (zdroje radonu, způsob šíření v objektu atd.) současně se zhodnocením celkového stavu daného objektu (těsnost jednotlivých částí objektu, poloha obytných místností vůči zdroji a šíření radonu v domě, systém větrání atd.). Pokud jsou obytné prostory odděleny od podlaží sklepem nebo v nich hodnota ekvivalentní objemová aktivita radonu nepřevyšuje $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ stačí provést jednoduchá opatření typu zvýšení intenzity výměny vzduchu a utěsnění vstupních cest radonu do objektu. Pokud je tato hodnota vyšší než $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ musí se (podle technického stavu budovy a propustnosti podloží) provést další protiradonové opatření (instalace bodového odvětrávání podloží, rekonstrukce podlah zahrnující položení nové protiradonové izolace, nucená ventilace vnitřního ovzduší). Pokud je to nutné mohou se dále provést opatření proti radonu ze stavebních materiálů, která zahrnují odstranění materiálů o vysoké plošné exhalaci radonu (možné jen u nenosných konstrukcí jako jsou omítky, štuky atd.) a snížení exhalace radonu z těchto materiálů neprodyšnou úpravou vnitřního povrchu pomocí speciálních nátěrů a tapet (bohužel nízká účinnost a životnost). Pokud je to nutné mohou se také provést opatření proti radonu z vody. Radon lze z vody odstranit pomocí speciálních zařízení (např.: aerace vody), ale v rámci

domácností je to kvůli ekonomickým důvodům hlavně dostatečné větrání místností s velkou spotřebou vody. Za velmi dobrý výsledek považují, že pouze na přibližně 18 % dotazníků byly u této otázky zaškrtnuty špatné odpovědi. Tento fakt je mimo jiné způsoben tím, že v České republice je vyšší radonové riziko a proto je povědomí (také díky vyšší medializaci) veřejnosti o této problematice vyšší, než je tomu u ostatních přírodních radionuklidů.

Průměrný počet správných odpovědí na dotaznících dosáhl hodnoty 5,04 (u otázky č. 5 jsem považoval za správnou odpověď, pokud byly zaškrtnuty alespoň dvě ze čtyř možných odpovědí; u otázky č. 6 alespoň jedna ze dvou možných odpovědí). Nejhorších výsledků bylo dosaženo ve skupině do 19 let (průměr správných odpovědí 3,94). Tato skupina zahrnovala studenty gymnázií a odborných středních škol. Daný výsledek je podle mého názoru způsoben nedostatečným zařazením této problematiky do výukového systému České republiky stejně jako nezájmem mladých lidí o tuto problematiku. Naopak nejlepších výsledků bylo dosaženo v kategorii 19 – 26 let (průměr správných odpovědí 5,91). V této kategorii byly zaznamenány 2 vrcholy správných odpovědí. První kolem tří až čtyř správných odpovědí. Těchto výsledků dosáhli pravděpodobně středoškolsky vzdělaní lidé, kteří již v dalším vzdělání nepokračovali. Druhý kolem šesti, sedmi až osmi správných odpovědí. Těchto výsledků dosáhli pravděpodobně studenti vysokých škol nebo lidé, kteří se o tuto problematiku hlouběji zajímají (například kvůli plánované výstavbě úložiště radioaktivního odpadu v blízkosti jejich bydliště atd.). O něco horších výsledků bylo dosaženo v kategorii 26 let a výš (průměr správných odpovědí 4,94). I u této kategorie je možno pozorovat 2 vrcholy správných odpovědí. První kolem tří správných odpovědí. Těchto výsledků dosáhli pravděpodobně středoškolsky vzdělaní lidé, kteří již v dalším vzdělání nepokračovali a o danou problematiku se podrobněji nezajímali. Druhý kolem pěti a šesti správných odpovědí. Těchto výsledků dosáhli pravděpodobně absolventi vysokých škol, lidé pracující v oboru nebo lidé, kteří se o tuto problematiku hlouběji zajímají z výše zmíněných důvodů.

6 Závěr

Tato práce jednoznačně potvrdila zadanou hypotézu. Radiační zátěž z umělých radionuklidů je tedy v České republice výrazně menší než z radionuklidů přírodních. Současně byly splněny i cíle této práce. Kapitoly 1.5, 1.6, 1.7 a 1.8 tvoří přehled umělých radionuklidů, které se uvolnily a uvolňují do životního prostředí a pomocí dotazníků byla zjištěna informovanost obyvatelstva o této problematice. Tato informovanost není nejhorší, ale rozhodně je nedostatečná. Třetí cíl práce je zlepšení této informovanosti veřejnosti o této problematice pomocí využití této práce. Nejlépe by se toho dosáhlo (v dlouhodobém horizontu) zařazením této problematiky podrobněji do výukového systému v České republice.

7 Seznam použité literatury

- 1) HÁLA, J. Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie. 1. vydání. Brno: Konvoj, 1998. 310 s. ISBN 80-85615-56-8.
- 2) KOLEKTIV AUTORŮ. Goiânia akcident
(online) Platný http://en.wikipedia.org/wiki/Goi%C3%A2nia_accident, květen 2, 2008
- 3) KOLEKTIV AUTORŮ. Monitorování složek životního prostředí
(online) Platný <http://www.suro.cz/cz/rms/monitorovani-slozek-zivotniho-prostredi>, květen 2, 2008
- 4) KOLEKTIV AUTORŮ. Principy a praxe radiační ochrany. Praha: Azin cz s.r.o., 2000. 606 s. ISBN 80-238-3703-6
- 5) KOLEKTIV AUTORŮ. Přírodní radioaktivita a problematika radonu
(online) Platný <http://www.suro.cz/cz/prirodnioz>, květen 2, 2008
- 6) KOLEKTIV AUTORŮ. Radon v domě
(online) Platný <http://www.suro.cz/cz/faq/radon>, květen 2, 2008
- 7) KOLEKTIV AUTORŮ. Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2006 - Část II
(online) Platný http://www.sujb.cz/docs/VZ_SUJB_2007_cast_II.pdf, květen 2, 2008
- 8) KUNA P., NAVRÁTIL L. Klinická radiobiologie. 1. vydání. Praha: Manus, 2005. 217 s. ISBN 80-86571-09-2.
- 9) NAVRÁTIL, L., ROSINA J. a kol.: Medicínská biofyzika, Grada Publishing, 2005, 524 s., ISBN 80-247-1152-4.
- 10) ÖSTERREICHER, J., VÁVROVÁ, J.: Přednášky z radiobiologie, Manus 2003, 116 s., ISBN 80-86571-01-7.
- 11) PITSCHMANN, V. Jaderné zbraně: nejvyšší forma zabíjení. 1. vydání. Praha: Naše vojsko, s.r.o., 2005. 390 s. Historie a vojenství. ISBN 80-206-0784-6.

- 12) ULLMANN, V., Jaderná a radiační fyzika
(online) Platný <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika.htm>, květen 2, 2008
- 13) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388
- 14) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 1996 Report to the General Assembly, with scientific annexes, 1996, 86 s., ISBN 92-1-142219-1
- 15) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes, 1993, 922 s., ISBN 92-1-142200-0
- 16) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, effects and risks of ionizing radiation, UNSCEAR 1988 Report to the General Assembly, with scientific annexes, 1988, 647 s., ISBN 92-1-142143-8
- 17) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects, UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with annexes, 1982, 773 s.
- 18) Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 184/1997 o požadavcích na zajištění radiační ochrany.
- 19) Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně ve znění vyhlášky č. 499/2006 Sb.
- 20) Zákon č. 18/1997Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění zákona č. 83/1998 Sb., zákona č. 71/2000 Sb., zákona č. 132/2000 Sb., a zákona č. 13/2002 a příslušné vyhlášky.

8 Klíčová slova

Radioaktivita

Ionizující záření

Radionuklid

Životní prostředí

Radon

Key words:

Radioactivity

Ionizing radiation

Radionuclide

Environment

Radon

9 Přílohy

Seznam příloh:

Příloha 1: schémata ke kapitole 1.3.1

Příloha 2: tabulky ke kapitolám 1.3.2 a 1.3.2.1

Příloha 3: tabulky ke kapitole 1.3.3

Příloha 4: tabulky a grafy ke kapitole 1.3.3.1

Příloha 5: tabulky ke kapitole 1.3.3.3

Příloha 6: tabulky ke kapitolám 1.3.3.4 a 1.3.3.5

Příloha 7: tabulky a obrázky ke kapitolám 1.4.1 a 1.4.2

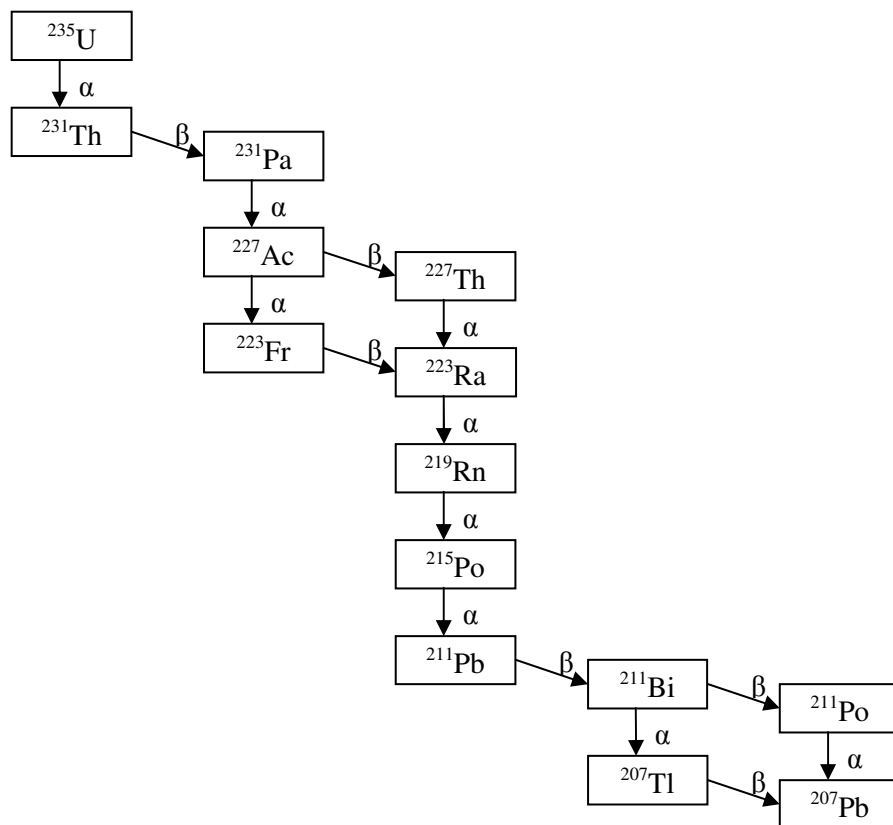
Příloha 8: tabulky ke kapitole 1.5

Příloha 9: tabulky ke kapitole 1.6

Příloha 10: tabulky ke kapitole 1.7

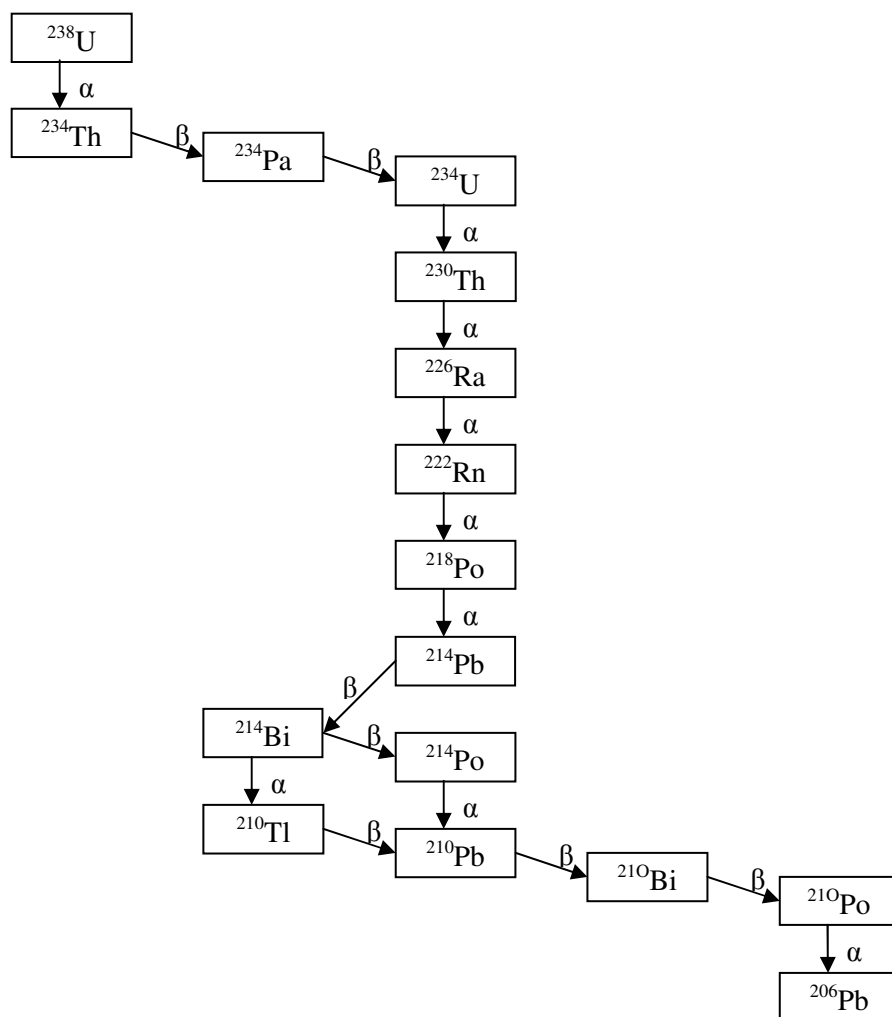
Příloha 1: schémata ke kapitole 1.3.1

Schéma č.1: aktiniová rozpadová řada



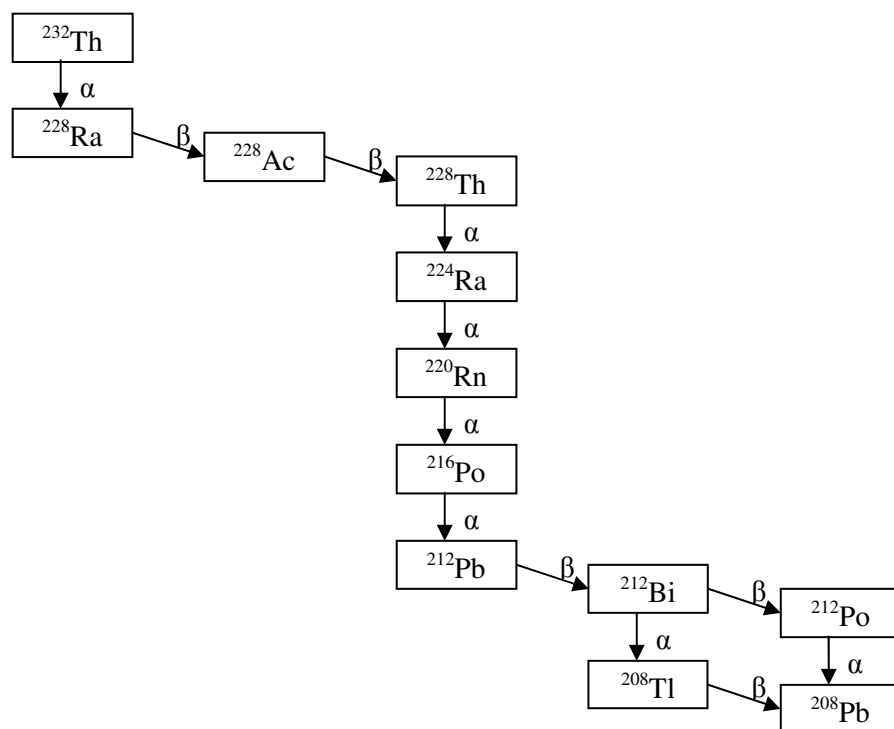
Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Principy a praxe radiační ochrany. Praha: Azin cz s.r.o., 2000. 606 s. ISBN 80-238-3703-6

Schéma č. 2: uran – radiová rozpadová řada



Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Principy a praxe radiační ochrany. Praha: Azin cz s.r.o., 2000.
606 s. ISBN 80-238-3703-6

Schéma č. 3: thoriová rozpadová řada



Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Principy a praxe radiační ochrany. Praha: Azin cz s.r.o., 2000.
606 s. ISBN 80-238-3703-6

Příloha 2: tabulky ke kapitolám 1.3.2 a 1.3.2.1

Tabulka 1 – fyzikální vlastnosti kosmogeních radionuklidů

Prvek	Izotop	Poločas rozpadu	Druh rozpadu
vodík	³ H	12,33 let	100 % beta
beryllium	⁷ Be	53,29 dní	100 % elektronový záchyt
	¹⁰ Be	1,51.10 ⁶ let	100 % beta
uhlík	¹⁴ C	5730 let	100 % beta
sodík	²² Na	2,602 roku	100 % elektronový záchyt
hliník	²⁶ Al	7,4.10 ⁵ let	100 % elektronový záchyt
křemík	³² Si	172 let	100 % beta
fosfor	³² P	14,26 dní	100 % beta
	³³ P	25,34 dní	100 % beta
síra	³⁵ S	87,51 dní	100 % beta
chlor	³⁶ Cl	3,01.10 ⁵ let	98,1 % beta, 1,9 % el. zách.
argon	³⁷ Ar	35,04 dní	100 % elektronový záchyt
	³⁹ Ar	269 let	100 % beta
krypton	⁸¹ Kr	2,29.10 ⁵ let	100 % elektronový záchyt

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 2 – distribuce ¹⁴C a absorbovaná dávka

Orgán/tkáň	Množství uhlíku (g.kg ⁻¹)	Aktivita ¹⁴ C (Bq.kg ⁻¹)	Roční absorbovaná dávka (μGy)
pohlavní orgány	89	20	5
plíce	100	23	5,7
kostní dřeň	410	93	24
kostní tkáň	---	---	22
štítná žláza	105	24	5,9
ostatní tkáně	230	52	13

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects, UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with annexes, 1982, 773 s.

Tabulka 3 – distribuce tritia a absorbovaná dávka

Orgán/tkáň	Množství vodíku (g.kg ⁻¹)	Aktivita ³ H (Bq.kg ⁻¹)	Roční absorbovaná dávka (μGy)
pohlavní orgány	100	0,4	0,01
plíce	99	0,4	0,01
kostní dřev	100	0,4	0,01
kostní tkáň	---	---	0,01
štítná žláza	100	0,4	0,01
ostatní tkáň	105	0,4	0,01

Zdroj: Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects, UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with annexes, 1982, 773 s.

Tabulka 4 – Produkce a koncentrace kosmogeních radionuklidů v atmosféře

Radionuklid	Produkce		Množství v atmosféře (PBq)	Objemová aktivita (mBq.m ⁻³)
	plošná (atom.m ⁻² .s ⁻¹)	roční množství (PBq/rok)		
³ H	2500	72	1275	1,4
⁷ Be	810	1790	413	12,5
¹⁰ Be	450	0,000064	230	0,15
¹⁴ C	25000	1,54	12750	56,3
²² Na	0,86	0,12	0,44	0,0021
²⁶ Al	1,4	0,000001	0,71	1,5.10 ⁻⁸
³² Si	1,6	0,00087	0,82	0,000025
³² P	8,1	73	4,1	0,27
³³ P	6,8	35	3,5	0,15
³⁵ S	14	21	7,1	0,16
³⁶ Cl	11	0,000013	5,6	9,3.10 ⁻⁸
³⁷ Ar	8,3	31	4,2	0,43
³⁹ Ar	56	0,074	28,6	6,5
⁸¹ Kr	0,01	1,7.10 ⁻⁸	0,005	0,0012

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 5 – roční příjem kosmogenních radionuklidů a efektivní dávky

Radionuklid	Příjem (Bq)	Roční efektivní dávka (μSv)
⁷ Be	1000	0.03
¹⁴ C	20 000	12
³ H	500	0.01
²² Na	50	0.15

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Příloha 3: tabulky ke kapitole 1.3.3

Tabulka 6 – terestrální radionuklidy mimo rozpadové řady

Prvek	Izotop	Poločas rozpadu	Druh rozpadu
draslík	^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$ let	89,3 % beta, 10,7 % el. zách.
rubidium	^{87}Rb	$4,75 \cdot 10^{10}$ let	100% beta
lanthan	^{138}La	$1,05 \cdot 10^{11}$ let	33,6 % beta, 66,4 % el. zách.
samarium	^{147}Sm	$1,06 \cdot 10^{11}$ let	100 % alfa
lutecium	^{176}Lu	$3,73 \cdot 10^{10}$ let	100 % beta

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 7 – terestrální radionuklidy – řada ^{238}U

Prvek	Izotop	Poločas rozpadu	Druh rozpadu
uran	^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$ let	100 % alfa
thorium	^{234}Th	24,10 dne	100 % beta
protaktinium	^{238}Pa	1,17 minuty	99,8 % beta, vnitřní konverze
uran	^{234}U	$2,45 \cdot 10^5$ let	100 % alfa
thorium	^{230}Th	$7,54 \cdot 10^4$ let	100 % alfa
radium	^{226}Ra	1600 let	100 % alfa
radon	^{222}Rn	3,824 dne	100 % alfa
polonium	^{218}Po	3,05 minuty	99,98 % alfa, 0,02 % beta
olovo	^{214}Pb	26,8 minuty	100 % beta
bismut	^{214}Bi	19,9 minuty	99,98 % beta, 0,02 % alfa
polonium	^{214}Po	164 μs	100 % alfa
thalium	^{210}Tl	1,3 minuty	100 % beta
olovo	^{210}Pb	22,3 let	100 % beta
bismut	^{210}Bi	5,013 dne	100 % beta
polonium	^{210}Po	138,4 dne	100 % alfa

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 8 – terestrální radionuklidy – řada ^{232}Th

Prvek	Izotop	Poločas rozpadu	Druh rozpadu
thorium	^{232}Th	$1,405 \cdot 10^{10}$ let	100 % alfa
radium	^{228}Ra	5,75 let	100 % beta
aktinium	^{228}Ac	6,15 hodin	100 % beta
thorium	^{228}Th	1,912 roku	100 % alfa
radium	^{224}Ra	3,66 dne	100 % alfa
radon	^{220}Rn	55,6 sekund	100 % alfa
polonium	^{216}Po	0,145 sekund	100 % alfa
olovo	^{212}Pb	10,64 hodin	100% beta
bismut	^{212}Bi	60,55 minuty	36 % alfa, 64 % beta
polonium	^{212}Po	0,299 μs	100 % alfa
thalium	^{208}Tl	3,053 minuty	100 % beta

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 9 – terestrální radionuklidy – řada ^{235}U

Prvek	Izotop	Poločas rozpadu	Druh rozpadu
uran	^{235}U	$7,038 \cdot 10^8$ let	100 % alfa
thorium	^{231}Th	25,52 hodiny	100 % beta
protaktinium	^{231}Pa	32760 let	100 % alfa
aktinium	^{227}Ac	21,77 let	98,4 % beta, 1,6 % alfa
thorium	^{227}Th	18,72 dní	100 % alfa
francium	^{223}Fr	21,8 minuty	100 % beta
radium	^{223}Ra	11,44 dne	100 % alfa
radon	^{219}Rn	3,96 sekundy	100 % alfa
polonium	^{215}Po	1,781 milisekundy	100 % alfa
olovo	^{211}Pb	36,1 minuty	100 % beta
bismut	^{211}Bi	2,14 minuty	99,7 % alfa, 0,3 % beta
thalium	^{207}Tl	4,77 minuty	100 % beta

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 10 – lokality s vysokým radiačním pozadím

Země	Lokalita	Charakteristika lokality	Absorbovaná dávka (nGy.h ⁻¹)
Brazílie	Guarapari	monazitové písky	90 – 90 000
	Mineas Gerais, Goiás Pocos de Caldas Araxa	vulkanické vyvřeliny	110 – 1300
Čína	Yangjiang	monazitové částice	průměrně 370
	Quangdong		
Egypt	delta Nilu	monazitové písky	20 – 400
Francie	centrální region	žula, břidlice, pískovec	20 – 400
	jihozápad	uranové minerály	10 – 10000
Indie	Kerala, Madras	monazitové písky	200 – 4000
	delta Gangy		260 – 440
Írán	Ramsar	pramenité vody	70 – 70000
	Mahallat		800 – 4000
Itálie	Lazio	vulkanické půdy	průměrně 180
	Kampánie		průměrně 200
	Orvieto		průměrně 560
	Jižní Toskánsko		150 – 200
ostrov Niue	Pacifický oceán	vulkanické půdy	do 1100
Švýcarsko	Tessin, Alpy, Jura	rula, krasové půdy	100 - 200

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Příloha 4: tabulky a grafy ke kapitole 1.3.3.1

Tabulka 11 – koncentrace vybraných terestrálních radionuklidů v půdě (Bq.kg⁻¹)

⁴⁰ K		²³⁸ U		²²⁶ Ra		²³² Th	
průměr	rozsah	průměr	rozsah	průměr	rozsah	průměr	rozsah
400	140-850	35	16-110	35	17-60	30	11-64

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 12 – průměrný obsah významnějších terestrálních radionuklidů ve vodě

Radionuklid	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²³⁵ U
Koncentrace (mBq.l ⁻¹)	1	0,1	0,5	10	5	0,05	0,5	0,05	0,04

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 13 – obsah přírodních radionuklidů ve vodách ČR

Prvek	Izotop	Výskyt ve vodě (Bq.l ⁻¹)	Konverzní faktory pro výpočet efektivní dávky (μSv.Bq ⁻¹)
uran	238U	10 ⁻³ – 10 ⁻¹	0,045
	234U	10 ⁻³ – 10 ⁻¹	0,049
	235U	10 ⁻⁴ – 10 ⁻²	0,047
thorium	234Th	10 ⁻³ – 10 ⁻¹	0,003
	230Th	do 10 ⁻²	0,21
	232Th	do 10 ⁻²	0,23
	228Th	do 10 ⁻²	0,072
	227Th	do 10 ⁻³	0,009
radium	228Ra	10 ⁻³ – 10 ⁻²	0,69
	226Ra	10 ⁻³ – 10 ⁻²	0,28
	224Ra	10 ⁻³ – 10 ⁻²	0,065
	223Ra	do 10 ⁻²	0,1
radon	222Rn	1 - 1000	0,01
polonium	210Po	10 ⁻³ – 10 ⁻²	1,2
olovo	210Pb	10 ⁻³ – 10 ⁻²	0,69
paladium	231Pa	do 10 ⁻³	0,71
aktinium	227Ac	do 10 ⁻³	1,1

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 14 – průměrné koncentrace významnějších radionuklidů ve vzduchu (μBq.m⁻³)

Radionuklid	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²³⁴ U
Rozsah	0,02- 18	0,02- 0,7	0,8- 32	28- 2250	10-80	0,01- 0,9	0,3- 1,5	---	---
Průměr	1	0,5	1	500	50	0,5	1	1	1

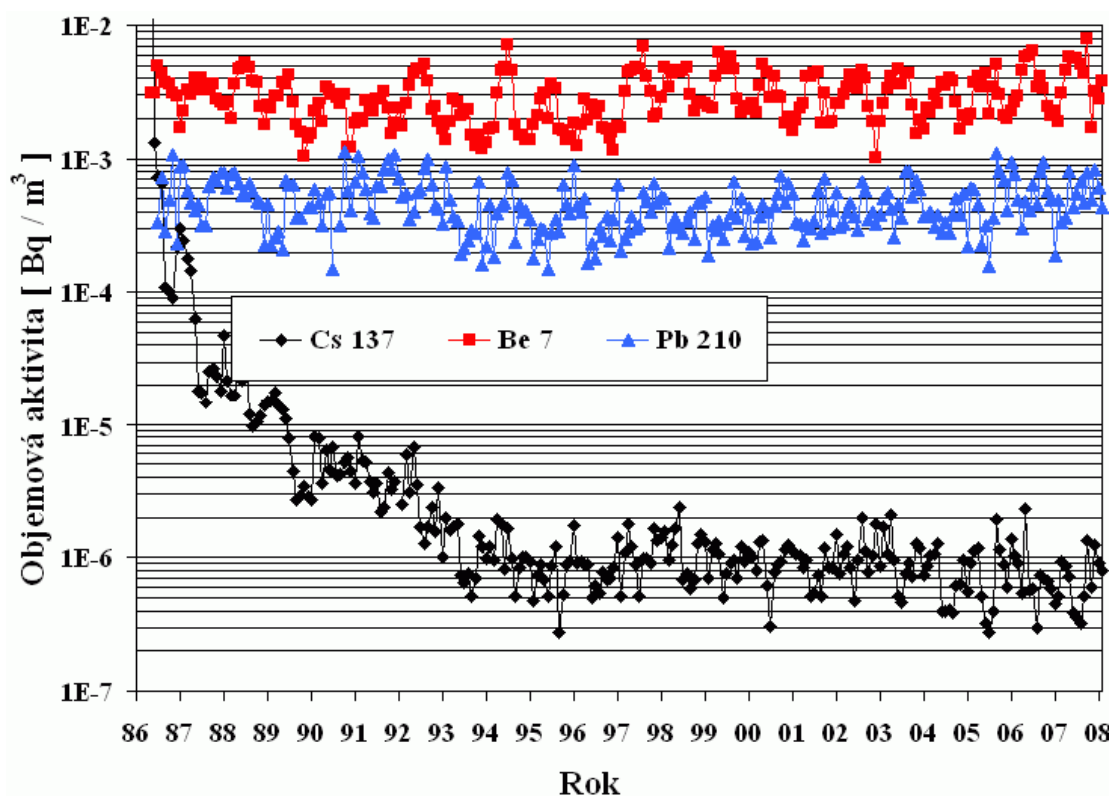
Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 15 – obsah vybraných radionuklidů ve vybraných potravinách (mBq.kg⁻¹)

Potraviny	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²³⁵ U
Mléčné p.	1	0,5	5	15	15	0,3	5	0,3	0,05
Maso	2	2	15	80	60	1	10	1	0,05
Obilniny	20	10	80	50	60	3	60	3	1
Listová zelenina	20	20	50	80	100	15	40	15	1
Kořenová z., ovoce	3	0,5	30	30	40	0,5	20	0,5	0,1
Ryby	30	10	100	200	2000	10	---	100	---

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

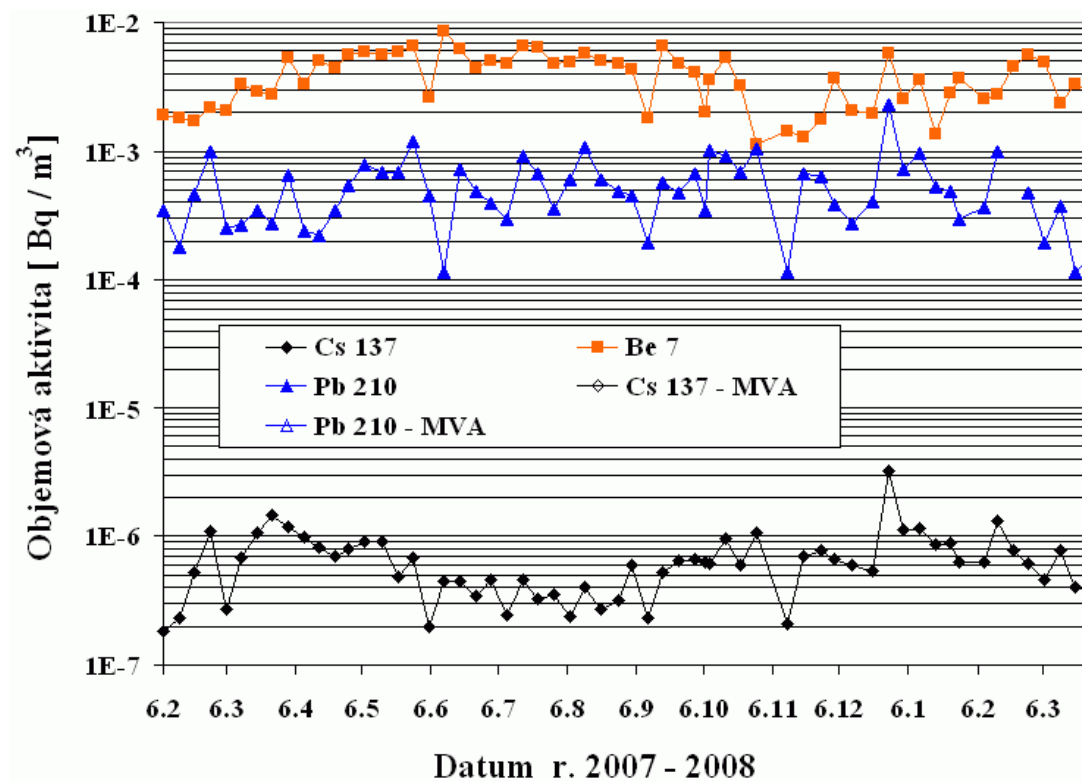
Graf 1 - časový průběh průměrných měsíčních objemových aktivit ^{137}Cs , ^7Be a ^{210}Pb ve vzdušném aerosolu od roku 1986



Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Monitorování složek životního prostředí

(online) Platný <http://www.suro.cz/cz/rms/monitorovani-slozek-zivotniho-prostredi>, květen 2, 2008

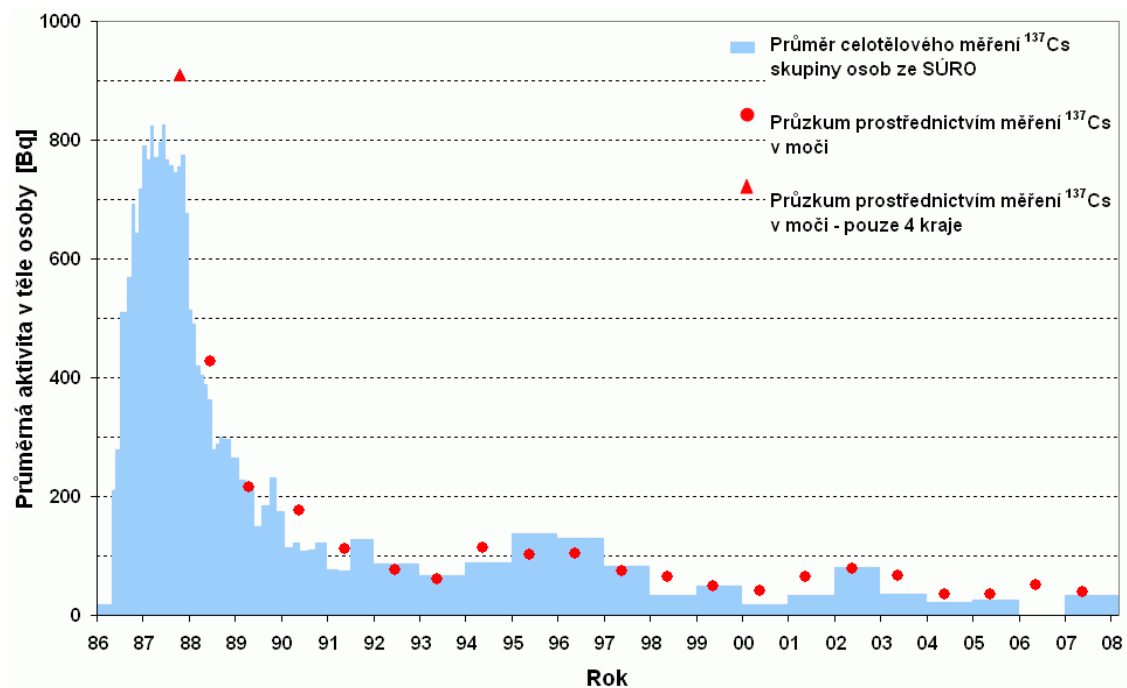
Graf 2 - aktuální týdenní průměrné objemové aktivity ^{137}Cs , ^7Be a ^{210}Pb



Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Monitorování složek životního prostředí

(online) Platný <http://www.suro.cz/cz/rms/monitorovani-slozek-zivotniho-prostredi>, květen 2, 2008

Graf 3 - vývoj obsahu ^{137}Cs v lidském organismu po černobylské havárii



Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Monitorování složek životního prostředí

(online) Platný <http://www.suro.cz/cz/rms/monitorovani-slozek-zivotniho-prostredi>, květen 2, 2008

Tabulka 16 - hmotnostní a objemová aktivita ^{137}Cs ve vybraných potravinách v r. 2007

Složka	Jednotka	Rozpětí hodnot ¹⁾
mléko	Bq.l^{-1}	$8,8 \cdot 10^{-3} - 1,0 \cdot 10^{-1}$
mléko sušené	Bq.kg^{-1}	$1,1 \cdot 10^{-1} - 10$
maso hovězí	Bq.kg^{-1}	$<3,6 \cdot 10^{-2} - 2,7$
maso vepřové	Bq.kg^{-1}	$<2,4 \cdot 10^{-2} - 6,0 \cdot 10^{-1}$
drůbež	Bq.kg^{-1}	$<2,3 \cdot 10^{-2} - 1,9 \cdot 10^{-1}$
zelenina	Bq.kg^{-1}	$1,3 \cdot 10^{-3} - 3,6 \cdot 10^{-1}$
ovoce	Bq.kg^{-1}	$3,2 \cdot 10^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-1}$
lesní plody	Bq.kg^{-1}	$<2,5 \cdot 10^{-2} - 12$
houby	Bq.kg^{-1}	$<2,4 \cdot 10^{-1} - 340$

1) Vzhledem k charakteru souboru dat je uvedeno pouze rozpětí hodnot. V případě, že se v souboru vyskytují hodnoty pod MVA (minimálně významná aktivita pro hladinu spolehlivosti 95 %), je jako spodní hranice rozpětí uvedena nejnižší hodnota souboru; pokud je touto hodnotou MVA, je toto vyznačeno znakem „<“. (Některé hodnoty MVA mohou být z důvodu rozdílné citlivosti jednotlivých měření vyšší než nejnižší naměřené hodnoty.)

Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Monitorování složek životního prostředí

(online) Platný <http://www.suro.cz/cz/rms/monitorovani-slozek-zivotniho-prostredi>, květen 2, 2008

Příloha 5: tabulky ke kapitole 1.3.3.3

Tabulka 17 – efektivní dávka způsobená inhalací přírodních radionuklidů (μSv)

Radionuklid	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²³⁴ U
Efektivní dávka	0,021	0,048	0,026	4	1,2	0,084	0,021	0,29	0,026

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 18 – ingesce přírodních radionuklidů

Radionuklid	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²³⁴ U
Příjem (Bq)	5,7	3	22	30	58	1,7	15	3	5,7
Efektivní dávka(μSv)	0,25	0,58	8	28	85	0,36	21	0,25	0,28

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Příloha 6: tabulky ke kapitolám 1.3.3.4 a 1.3.3.5

Tabulka 19 – distribuce draslíku a absorbovaná dávka

Orgán/tkáň	Množství draslíku (g.kg ⁻¹)	Aktivita ⁴⁰ K (Bq.kg ⁻¹)	Roční absorbovaná dávka (μGy)
pohlavní orgány	2,1	64	180
pľíce	2,1	64	180
kostní dřeň	4,4	130	270
kostní tkáň	---	---	140
štítná žláza	1,1	33	100
ostatní tkáňe	2,0	61	170

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 20 – obsah radionuklidů v lidských tkáních (mBq.kg⁻¹)

	Plíce	Játra	Ledviny	Svaly	Kosti
²³⁸ U	20	3	30	5	100
²³⁰ Th	20	9	5	1	20 – 70 ^a
²²⁶ Ra	4,1	4,1	4,1	4,1	260
²¹⁰ Pb	200	400	200	100	3000
²¹⁰ Po	200	600	600	100	2400
²³² Th	20	3	3	1	6 – 24 ^a
²²⁸ Ra	20	3	2	2	100

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

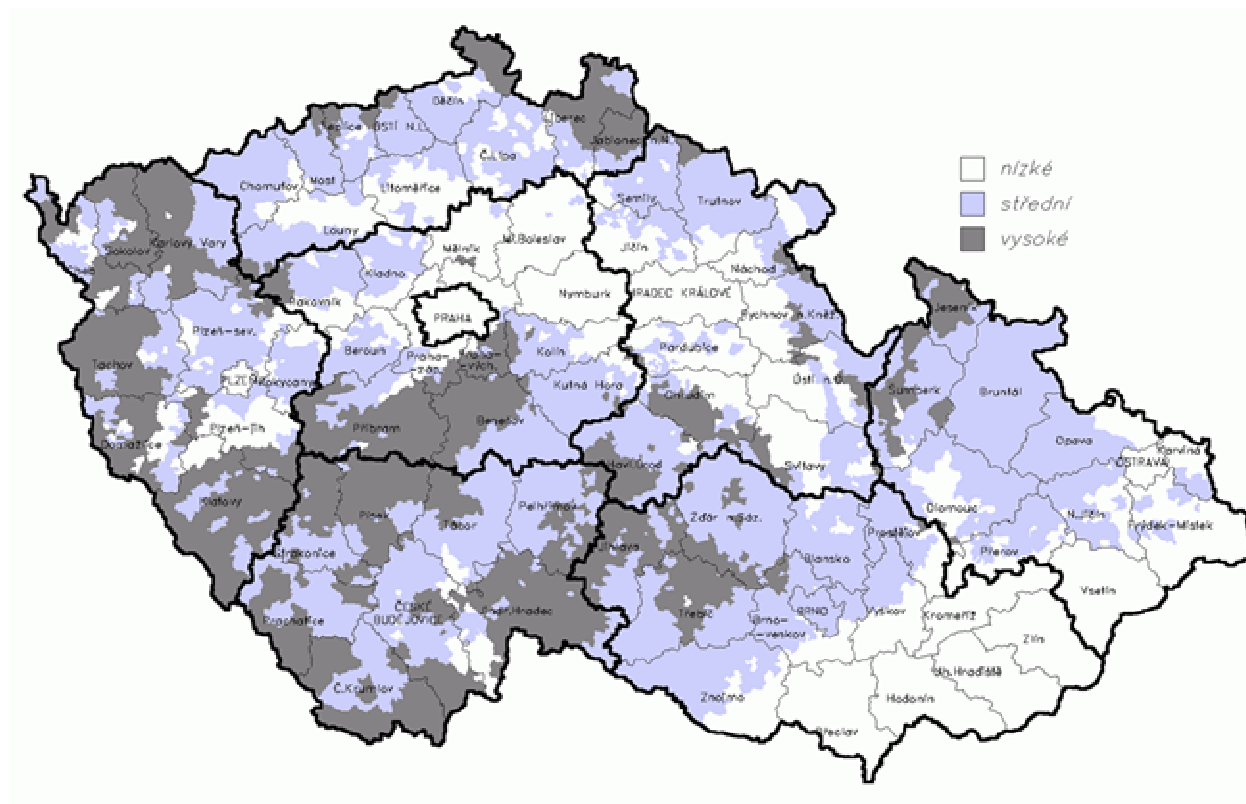
Tabulka 21 – roční efektivní dávka způsobená radionuklidy deponovanými v tkáních

Radionuklid	^{238/234} U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb/Po	²³² Th	^{228/224} Ra
Dávka (μSv)	6	6	7	80	4	18

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Příloha 7: tabulky a obrázky ke kapitolám 1.4.1 a 1.4.2

Obrázek 1 – mapa očekávaného radonového rizika v české republice



Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Radon v domě

(online) Platný <http://www.suro.cz/cz/faq/radon>, květen 2, 2008

Tabulka 22 – radonové riziko stavebního pozemku

Radonové riziko	Objemová aktivita radonu v půdním vzduchu při různé propustnosti půd (kBq.m ⁻³)		
	nízká propustnost	střední propustnost	vysoká propustnost
nízké	<30	<20	<10
střední	30-100	20-70	10-30
vysoké	>100	>70	>30

Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Principy a praxe radiační ochrany. Praha: Azin cz s.r.o., 2000. 606 s. ISBN 80-238-3703-6

Tabulka 23 – průměrné hmotnostní aktivity přírodních radionuklidů ve stavebních materiálech ČR (Bq.kg⁻¹)

	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
beton	34	25	490
cihla	49	52	670
pórobeton z popílku	45	54	460
škvárobeton	30	44	270

Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Principy a praxe radiační ochrany. Praha: Azin cz s.r.o., 2000. 606 s. ISBN 80-238-3703-6

Příloha 8: tabulky ke kapitole 1.5

Tabulka 24 – koncentrace přírodních radionuklidů v surovinách, produktech a odpadech vybraných průmyslových odvětví (kBq.kg⁻¹)

materiál	koncentrace v rudě / surovině		koncentrace v produktech / odpadech (hlušině)	
	řada ²³⁸ U	řada ²³² Th	řada ²³⁸ U	řada ²³² Th
zpracování fosfátů				
fosfáty	0,2-1,5	0,02	0,9-1,3 100 (²¹⁰ Po) 600 (²¹⁰ Pb)	0,02
umělá hnojiva	0,3-3	0,008-0,04	---	---
získávání thoria				
monazit	6-40	8-300	450 ^b	3000
zpracování ropy a zemního plynu				
zemní plyn	0,34 kBq.m ⁻³ ²²² Rn	---	1-1000 (usazeniny)	---
ropa	---	---	8-42 kBq.m ⁻³ (odpadní voda)	---
kovové rudy				
železná ruda	---	---	0,1-0,3 (uhelný dehet) 0,15 (struska)	0,15 (struska)
kasiterit	1	0,3		
pyrochlore	6-10	7-80	1 (struska)	4 (struska)
zpracování uhelného dehtu				
uhelný dehet	0,1-0,3 (²¹⁰ Po a ²¹⁰ Pb)	---	0,2-0,6 (elektrody)	
výroba koksu a elektřiny z uhlí				
uhlí	0,01-0,025	0,01-0,025	0,02-0,04 koks 0,1-0,3 dehet 0,2 popílek 0,4 popel	0,2 popílek
výroba cementu				
jíl	0,022	0,003	0,05-0,11 cement 0,02 křemen	0,03-1 cement 0,003 křemen
břidlice	0,04	0,056	---	---
minerální písky				
zirkoniový písek	0,2-74	0,4-40	---	---
bauxit	0,4-0,6	0,3-0,4		
ilmenit	2,3 (1,5 ²³⁸ U)	1,2		
rutil	3,8	0,56		
produkce titanových pigmentů				
ilmenit	2,3 (1,5 ²³⁸ U)	1,2	400 2,3 filtry 0,03 voda	1500 usazeniny 2,6 filtry 0,01 voda
titanová ruda	0,07-9	0,07-9		

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 25 – průměrné hodnoty radionuklidů uvolněných do ovzduší průmyslem (GBq/rok)

Průmysl	Suroviny kt/rok	²³⁸ U	²³⁸ Th	²²⁶ Ra	²²² Rn	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	⁴⁰ K
zpracování fosfátů - transport	570	---	---	---	563	66	490	---
		0,06	0,001	0,06	0,03	0,06	0,06	0,004
kyselina fosforečná	700	0,07	0,002	0,09	820	0,08	0,14	0,008
fosforečná hnojiva - transport	375	---	---	---	221	0,044	0,034	---
		0,02	0,0001	0,02	0,02	0,02	0,02	0,001
výroba železa - transport	7500	---	---	---	180	55	90	---
		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
zpracování uhelného dehtu	120	---	---	---	---	~0	~0	---
uhelná elektrárna - transport	1350	0,16	0,08	0,11	34	0,4	0,8	0,27
		0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,012
výroba koksu - transport	885	0,013	0,009	0,013	13	0,012	0,07	0,032
		0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,004
výroba cementu	2000	0,2	0,2	0,2	157	0,2	78	0,4
keramický průmysl	3200	0,03	0,03	0,03	0,03	0,09	0,3	0,14
zpracování minerálních písků	183 ^b	0,97	0,97	0,73	0,73	0,73	0,73	---
titanové pigmenty	50	0,001	0,001	0,001	6,2	0,001	0,001	---
elektrárna na zemní plyn (400 MW)	600 ^b	---	---		230	---	---	---
zpracování ropy	3500	---	---		540	---	---	---
zpracování zemního plynu	72000 ^b	---	---		500	---	---	---

b – 10⁶ m³/rok

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 26 – průměrné hodnoty radionuklidů uvolněných do vody průmyslem (GBq/rok)

Průmysl	Suroviny kt/rok	²³⁸ U	²³⁸ Th	²²⁶ Ra	²²² Rn	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	⁴⁰ K
zpracování fosfátů - transport	570	---	---	---	---	24	166	---
		0,18	0,002	0,18	0,18	0,18	0,18	0,013
kyselina fosforečná	700	336	8	737	---	654	997	79
fosforečná hnojiva - transport	375	---	---	---	---	0,054	0,057	---
		0,07	0,0004	0,07	0,07	0,07	0,06	0,002
výroba železa - transport	7500	---	---	---	---	0,51	8	---
		0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
zpracování uhelného dehtu	120	---	---	---	---	---	---	---
uhelná elektrárna - transport	1350	---	---	---	---	---	---	---
		0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,036
výroba koksu - transport	885	---	---	---	---	0,024	0,032	---
		0,004	0,003	0,004	0,004	0,005	0,004	0,011
výroba cementu	2000	---	---	---	---	---	---	---
keramický průmysl	3200	---	---	---	---	---	---	---
zpracování minerálních písků	183 ^b	0,088	0,011	0,066	0,066	0,066	0,066	---
titanové pigmenty	50	0,002	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	---
elektrárna na zemní plyn (400 MW)	600 ^b	---	---	---	---	---	---	---
zpracování ropy	3500	---	217	174	174	174	174	---
zpracování zemního plynu	72000 ^b	---	2,7	32	32	32	32	---

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 27 – maximální roční efektivní dávka způsobená radionuklidy uvolněnými činnostmi průmyslu

Průmysl	Efektivní dávka (μSv)		
	vnější expozice	inhalační expozice	ingesční expozice
zpracování fosfátů	130	2	<0,4
výroba kyseliny fosforečné	8	~2000	2
výroba P hnojiv	20	<0,4	15
produkce železa a oceli	8	<0,4	3
zpracování uhelného dehtu	4	<0,4	---
produkce koksu	4	<0,4	---
uhelné elektrárny	12	<0,4	4
elektrárny na zemní plyn	<0,4	<0,4	---
zpracování ropy a zemního plynu	2	<0,4	---
výroba cementu	5	<0,4	---
výroba keramiky	<0,4	<0,4	---
zpracování minerálních písků	60	<0,4	320
titanové pigmenty	<0,4	<0,4	1

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Příloha 9: tabulky ke kapitole 1.6

Tabulka 28 – radionuklidy vzniklé a globálně rozptýlené při atmosférickém testování jaderných zbraní

Radionuklid	Poločas rozpadu	Vzniklé množství (PBq)
³ H	12,33 roku	186000
¹⁴ C	5730 let	213
⁵⁴ Mn	312,3 dne	3980
⁵⁵ Fe	2,73 roku	1530
⁸⁹ Sr	50,53 dne	117000
⁹⁰ Sr	28,78 roku	622
⁹¹ Y	58,51 dne	120000
⁹⁵ Zr	64,02 dne	148000
¹⁰³ Ru	39,26 dne	247000
¹⁰⁶ Ru	373,6 dne	12200
¹²⁵ Sb	2,76 roku	741
¹³¹ I	8,02 dne	675000
¹⁴⁰ Ba	12,75 dne	759000
¹⁴¹ Ce	32,50 dne	263000
¹⁴⁴ Ce	384,9 dne	30700
¹³⁷ Cs	30,07 roku	948
²³⁹ Pu	24110 let	6,52
²⁴⁰ Pu	6563 let	4,35
²⁴¹ Pu	14,35 roku	142

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 29 – celosvětová roční průměrná efektivní dávka – externí ozáření (μSv)

Období	¹³¹ I	¹⁴⁰ Ba,La	¹⁴¹ Ce	¹⁰³ Ru	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb
1945-1999	1,58	26,7	1,09	12	81,3	81,3
2000-2099	---	---	---	---	---	---
2100-2199	---	---	---	---	---	---
2200-∞	---	---	---	---	---	---
Období	¹⁴⁴ Ce,Pr	⁵⁴ Mn	¹⁰⁶ Ru,Rh	¹²⁵ Sb	¹³⁷ Cs	celkem
1945-1999	7,94	19,2	24,5	12,2	166	353
2000-2099	---	---	---	0,003	114	114
2100-2199	---	---	---	---	11,4	11,4
2200-∞	---	---	---	---	1,3	1,3

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 30 - celosvětová roční průměrná efektivní dávka – ingesce (μSv)

Období	¹³¹ I	¹⁴⁰ Ba	¹⁴⁰ La	⁸⁹ Sr	⁵⁵ Fe
1945-1999	64,2	0,51	0,51	1,9	6,6
2000-2099	---	---	---	---	---
2100-2199	---	---	---	---	---
2200-∞	---	---	---	---	---
Období	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	³ H	¹⁴ C	celkem
1945-1999	97	154	23	144	491
2000-2099	8,6	10	0,1	120	139
2100-2199	0,02	0,5	---	50	50,5
2200-∞	---	0,03	---	2180	2180

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Tabulka 31 - celosvětová roční průměrná efektivní dávka za období 1945-1985 – inhalace

Radionuklid	Dávka (μSv)	Radionuklid	Dávka (μSv)
^{131}I	2,58	^{54}Mn	0,11
^{140}Ba	0,40	^{106}Ru	35,2
^{141}Ce	0,77	^{125}Sb	0,085
^{103}Ru	0,93	^{55}Fe	0,014
^{89}Sr	2,56	^{90}Sr	9,22
^{91}Y	4,07	^{137}Cs	0,33
^{95}Zr	2,92	Pu, Am	37,8
^{144}Ce	52,5	celkem	149

Zdroj: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Volume I: Sources, 2000, 658 s., ISBN 9211422388

Příloha 10: tabulky ke kapitole 1.7

Tabulka 32 – přehled aktivit jednotlivých radionuklidů vypouštěných do ovzduší z JE Dukovany v roce 2006

	Ventilační komín 1	Ventilační komín 2
	aktivita (rozpětí aktivit) [GBq, MBq, kBq]	
Vzácné plyny [GBq]		
celkem ¹⁾	7130	
¹³³ Xe	117	111
¹³⁵ Xe	127	40,2
3H [GBq]	274	398
¹³¹ I celkem [MBq]	<10,8	
plynná forma	<5,3	<5,3
¹⁴ C ²⁾ [GBq]	744	
Aerosoly [kBq]		
⁵¹ Cr	>819;<1660	>2950;<3720
⁵⁴ Mn	>642;<698	>2280;<2920
⁵⁹ Fe	>35,6;<233	>559;<730
⁵⁷ Cp	<84,8	<84,8
⁵⁸ Co	>1460;<1530	>3240;<3290
⁶⁰ Co	>2160;<2170	3200
⁶⁵ Zn	<281	<281
⁷⁵ Se	<148	<148
⁹⁵ Zr	>320;<486	>508;<661
⁹⁵ Nb	>657;<742	>1130;<1190
¹⁰³ Ru	>26,2;<128	<106
^{110m} Ag	>1720;<2110	>733;<1110
¹²⁴ Sb	>869;<975	>506;<603
¹³⁴ Cs	<106	>21;<125
¹³⁷ Cs	>30,1;<150	>168;<267
¹⁴¹ Ce	<148	<148
¹⁴⁴ Ce	<636	<636
¹³¹ I	<117	<117
⁷⁶ As	<212	<212
¹⁸¹ Hf	>225;<323	>147;<239
⁸⁹ Sr	<12	<12
⁹⁰ Sr	<1,32	<1,32

1) sumární hodnota VK 1 + VK 2 (⁴¹Ar, ⁸⁵Kr, ^{85m}Kr, ⁸⁸Kr, ¹³³Xe, ¹³⁵Xe, ^{135m}Xe, ¹³⁸Xe)

2) sumární hodnota VK 1 + VK 2

Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2006 - Část II (online)

Platný http://www.sujb.cz/docs/VZ_SUJB_2007_cast_II.pdf, květen 2, 2008

Tabulka 33 – Přehled radionuklidů vypouštěných z JE Dukovany do vodotečí v roce 2006

	Aktivita [GBq, kBq]	
	1. dvojblok	2. dvojblok
³ H [GBq]	6730	7700
ostatní radionuklidy [kBq]		
⁵¹ Cr	<1440	<1440
⁵⁴ Mn	>2040;<2100	>1500;<1580
⁵⁹ Fe	<288	<288
⁵⁷ Co	<120	<120
⁵⁸ Co	>875;<971	>707;<773
⁶⁰ Co	>2630;<2700	>1800;<1870
⁶⁵ Zn	<408	<408
⁷⁵ Se	<216	<216
⁹⁵ Zr	<288	<288
⁹⁵ Nb	<144	<144
¹⁰³ Ru	<144	<144
^{110m} Ag	>562;<724	<216
¹²⁴ Sb	>77;<238	<168
¹³⁴ Cs	>1450;<1530	>471;<549
¹³⁷ Cs	>5050;<5130	>2430;<2480
¹⁴¹ Ce	<216	<216
¹⁴⁴ Ce	<960	<960
¹³¹ I	<168	<168
⁸⁹ Sr	<420	<420
⁹⁰ Sr	<24	<24

KOLEKTIV AUTORŮ. Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2006 - Část II
(online) Platný http://www.sujb.cz/docs/VZ_SUJB_2007_cast_II.pdf, květen 2, 2008

Tabulka 34 – Přehled aktivit jednotlivých radionuklidů vypouštěných do ovzduší z JE Temelín v roce 2006

	BAPP	HVB 1 vnitřní komín	HVB 1 vnější komín	HVB 2 vnitřní komín	HVB 2 vnější komín	Celkem
aktivita, rozpětí aktivit [GBq, MBq, kBq]						
Vzácné plyny [GBq]						
celkem ¹⁾	7700					
¹³³ Xe	---	933	1493	>1340;<1350	>1893;<1895	>5660;<5670
¹³⁵ Xe	---	>245;<246	>0,962;<1,79	>269;<271	>3,69;<4,95	>518;<524
⁴¹ Ar	---	>464;<465	<1,52	>589;<593	<2,15	>1050;<1060
⁸⁷ Kr	---	>16,3;<23,1	<1,85	>27,9;<36,1	<2,85	>44,2;<63,9
⁸⁸ Kr	---	>32,8;<46,3	<2,59	>43,1;<65,5	4,17	>75,9;<119
³ H [GBq]	153	266	210	663	325	1620
¹³¹ I celkem [MBq] ²⁾	170					
plynná forma	---	>7,64;<7,76	18,3	15,9	124	166
¹³¹ I	>0,151; <0,226	>0,0303; <0,0449	>0,102; <0,104	>0,171; <0,185	3,84	>4,29; <4,4
¹⁴ C [GBq]	>3,83; <3,84	246	0,891	309	0,998	561
Aerosoly [kBq]						
⁵¹ Cr	>156;<724	>2,04;<110	>59,8;<85,8	>6,48;<132	>329;<365	>553;<1420
⁵⁴ Mn	>150;<174	>2,21;<12,1	>15;<17,3	>0,993;<14,4	>30,3;<32,3	>198;<250
⁵⁷ Co	<55,8	<8,94	<2,63	<9,55	<5,95	<82,9
⁵⁸ Co	>122;<160	>2,04;<11,6	>28,7;<30,8	>2,89;<15,8	>220;<223	>376;<441
⁶⁰ Co	>179;<201	>9,36;<19,4	>9,01;<12,3	>0,424;<17,7	>32,8;<37,4	>230;<288
⁹⁵ Zr	>281;<382	<18,8	>44,3;<50	>4,84;<27,8	>114;<125	>444;<604
⁹⁵ Nb	>710;<739	>6,77;<17,8	>74,1;<76,2	>12,7;<26,5	>241;<243	>1040;<1100
¹⁰³ Ru	>7,98;<74,2	<11,7	<3,89	<13,9	>71,8;<76,4	>79,8;<180
¹²⁴ Sb	>545;<596	>27,2;<40,5	>16,9;<21	>11,7;<28,7	>218;<224	>818;<910
¹³⁴ Cs	>326;<333	>59,5;<60,5	>11;<13,3	>54;<60	154	>604;<621
¹³⁷ Cs	>340;<344	>61,2;<62,3	>17,6;<18,8	>53;<57,4	>140;<141	>612;<623
⁷⁶ As	>179;<201	>122;<386	<134	<267	<275	>122;<1060
⁸⁹ Sr	<31,4	<6,2	<9,32	<4,38	<11,1	<62,4
⁹⁰ Sr	<4,42	<0,970	<1,51	<0,8	<5,96	<13,7

1) Sumární hodnota BAPP + HVB1 (vnitřní komín) + HVB1 (vnější komín) + HVB2 (vnitřní komín) + HVB2 (vnější komín) pro ⁴¹Ar, ⁸⁵Kr, ^{85m}Kr, ⁸⁷Kr, ⁸⁸Kr, ¹³³Xe, ¹³⁵Xe, ^{135m}Xe

2) Sumární hodnota BAPP + HVB1 (vnitřní komín) + HVB1 (vnější komín) + HVB2 (vnitřní komín) + HVB2 (vnější komín)

Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2006 - Část II

(online) Platný http://www.sujb.cz/docs/VZ_SUJB_2007_cast_II.pdf, květen 2, 2008

Tabulka 35 – Celková aktivita radionuklidů vypouštěných z JE Temelín do hydrosféry v roce 2006

Radionuklid	³ H	⁵¹ Cr	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁷ Co	⁵⁸ Co
rozměr	[GBq]	[MBq]				
aktivita ¹⁾	37300	<232	>6,78; <30,3	<43,3	>0,0274; <22,1	>0,904; <23,9
Radionuklid	⁶⁰ Co	⁶⁵ Zn	⁹⁵ Zr	⁹⁵ Nb	¹⁰³ Ru	^{110m} Ag
rozměr	[MBq]					
aktivita ¹⁾	>2,2; <28,8	<48,7	>1,67; <43,6	>9,17; <34,1	>0,0183; <25,8	>6,88; <35,8
Radionuklid	¹²⁴ Sb	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹⁴¹ Ce	¹³¹ I	
rozměr	[MBq]					
aktivita ¹⁾	>37,3; <72,1	>74,9; <110	>76,6; <107	<40,2	>17,6; <45,9	

1) Roční souhrnná aktivita ve výpustech z 11 nádrží kapalných odpadů

Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2006 - Část II (online) Platný http://www.sujb.cz/docs/VZ_SUJB_2007_cast_II.pdf, květen 2, 2008

Tabulka 36 – objemové aktivity vzácných plynů a ¹⁴C u odběrů ve ventilačním komínu ÚJV Řež v roce 2006

Radionuklid	Poločas přeměny	[Bq.m ⁻³]
⁴¹ Ar	1,82 h	490000
⁸⁵ Kr	10,7 r	3,6
^{85m} Kr	4,48 h	420
⁸⁷ Kr	1,27 h	350
⁸⁸ Kr	2,86 h	1000
¹³³ Xe	5,25 d	< 250 ¹⁾
^{133m} Xe	2,19 d	140
¹³⁵ Xe	9,10 h	< 20 ¹⁾
¹⁴ C (spal. f.) ²⁾	5730 r	2,6
¹⁴ C (CO ₂)		18

1) Znak "<" má význam minimální významné aktivity pro hladinu spolehlivosti 95 %

2) spal. f. = spalitelné formy

Zdroj: KOLEKTIV AUTORŮ. Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2006 - Část II (online) Platný http://www.sujb.cz/docs/VZ_SUJB_2007_cast_II.pdf, květen 2, 2008