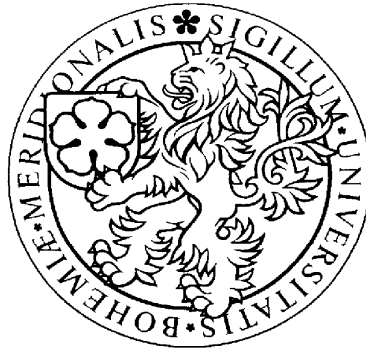


**JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
Zdravotně sociální fakulta**



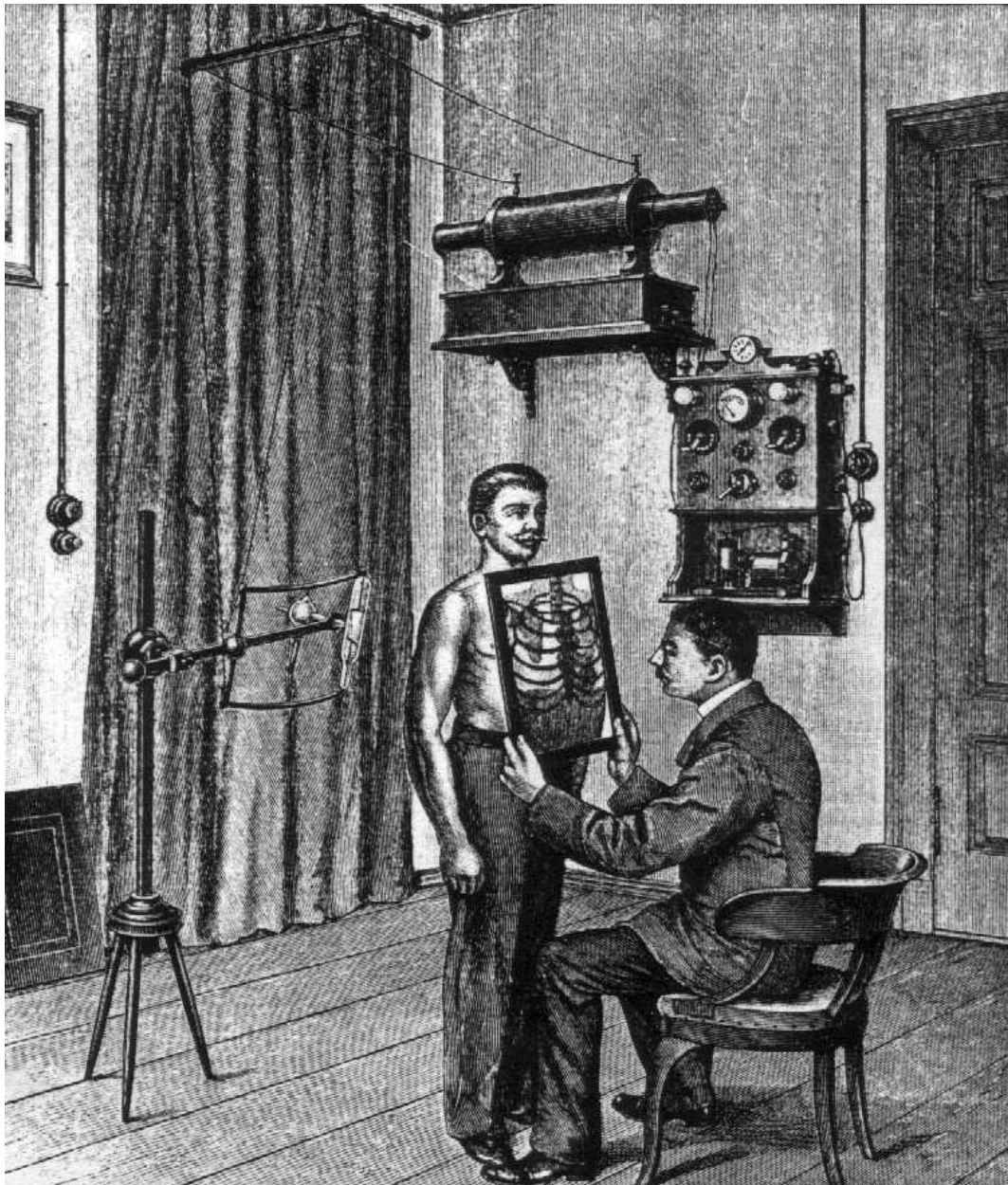
RADIAČNÍ OCHRANA

doplňkové texty pro posluchače kombinované formy studia

studijního oboru „Radiologický asistent“

Ing. Jan Matzner

ČESKÉ BUDĚJOVICE 2011



Obsah

1. VELIČINY A JEDNOTKY V RADIAČNÍ OCHRANĚ
2. ZÁKLADNÍ PRINCIPY RADIAČNÍ OCHRANY
3. OCHRANA PŘED VNĚJŠÍM OZÁŘENÍM
4. HODNOCENÍ RIZIKA Z VNITŘNÍHO OZÁŘENÍ
5. PŘÍRODNÍ ZDROJE ZÁŘENÍ
6. RADIAČNÍ OCHRANA V JADERNÉ ENERGETICE
7. LEGISLATIVA RADIAČNÍ OCHRANY

1. VELIČINY A JEDNOTKY V RADIAČNÍ OCHRANĚ

1.1 Základní veličiny

veličina	označení veličiny	jednotka	označení jednotky	rozměr
aktivita	A	becquerel	Bq	(s⁻¹)
Podíl středního počtu radioaktivních přeměn v určitém množství radionuklidu za časový interval a tohoto intervalu. měrné aktivity: hmotnostní (Bq/kg), objemová (Bq/m ³), plošná (Bq/m ²) [1 Ci=1 curie, 1 Ci=3,7.10 ¹⁰ Bq]				
dávka (absorbovaná dávka)	D	gray	Gy	(J/kg)
Podíl střední sdělené energie, kterou předá ionizující záření látce a hmotnosti této látky. [starší jednotka 1 rad=100 erg/g=10 mGy; 1 Gy=100 rad]				
expoze	X	-	-	(C/kg)
Podíl absolutní hodnoty celkového elektrického náboje iontů vzniklých ve vzduchu při zabrzdění všech elektronů a pozitronů <u>uvolněných fotony ve vzduchu</u> a hmotnosti tohoto vzduchu. [1 R=1 rentgen, historicky jako množství záření X nebo gama, které vytvoří určitý náboj v určitém množství vzduchu, 1 R=2,58.10 ⁻⁴ C.kg ⁻¹ , 1 C.kg ⁻¹ =3876 R, expoze 1 R odpovídá dávce 8,73 mGy ve vzduchu a 9,57 mGy ve tkáni, často se přibližně vyjadřuje jako 1 R=10 mGy=0,01 Gy]				
kerma	K	gray	Gy	(J/kg)
Podíl celkové kinetické energie všech <u>nabitých částic uvolněných nenabitými ionizujícími částicemi</u> v látce a hmotnosti této látky. [starší jednotky kermy jsou stejné jako starší jednotky dávky]				
ekvivalentní dávka	H_T	sievert	Sv	(J/kg)
Součin radiačního váhového faktoru w _R a střední (absorbované) dávky D _{T,R} v orgánu nebo tkáni T pro ionizující záření R. : $H_T = w_R D_{T,R} \cdot$ Je-li pole ionizujícího záření je složeno z více druhů záření nebo energií, musíme započítat všechny druhy R : $H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$				
efektivní dávka	E	sievert	Sv	(J/kg)
Součet součinů tkáňových váhových faktorů w _T a ekvivalentní dávky H _T ve všech ozářených tkáních nebo orgánech T, popisuje celotělové ozáření . $E = \sum_T w_T H_T = \sum_{R,T} w_T w_R D_{T,R} \cdot$				

Radiační váhové faktory w_R a tkáňové váhové faktory w_T jsou bezrozměrné veličiny a jsou např. uvedené v Tabulce č. 1 a 2 Přílohy 5 vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.

Tabulka č. 1
Radiační váhové faktory

Typ záření a příp. energie	Radiační váhový faktor w_R
fotony	1
elektrony, miony	1
neutrony, méně než 10 keV	5
neutrony, 10 keV až 100 keV	10
neutrony, 100 keV až 2 MeV	20
neutrony, 2 MeV až 20 MeV	10
neutrony, více než 20 MeV	5
protony, více než 2 MeV, (mimo odražené)	5
částice alfa, těžká jádra, štěpné fragmenty	20

Tabulka č. 2.
Tkáňové váhové faktory

Tkáň, orgán	Tkáňový váhový faktor w_T
Gonády	0,20
Červená kostní dřeň	0,12
Tlusté střevo	0,12
Plíce	0,12
Žaludek	0,12
Močový měchýř	0,05
Mléčná žláza	0,05
Játra	0,05
Jícen	0,05
Štítná žláza	0,05
Kůže	0,01
Povrchy kostí	0,01
Ostatní orgány a tkáně*)	0,05

*) Pro potřeby výpočtu jsou jako ostatní orgány a tkáně (zbytek těla) voleny následující tkáně a orgány: nadledvinky, mozek, vzestupná část tlustého střeva, tenké střevo, ledviny, svaly, slinivka břišní, slezina, thymus, děloha. Hlavní seznam obsahuje orgány, které mohou být s jistou pravděpodobností ozářeny selektivně. O některých z nich je známo, že mohou být citlivější ke vzniku nádoru. Jestliže se i u ostatních tkání a orgánů následně prokáže možnost rizika vzniku nádoru, budou rovněž se svou specifickou hodnotou w_T zahrnuty do hlavního seznamu, případně budou zařazeny do seznamu orgánů a tkání tvořících zbytek těla.

V těch výjimečných případech, při nichž tkáň nebo jeden orgán zařazený do zbytku těla obdrží ekvivalentní dávku přesahující nejvyšší dávku v kterémkoliv z dvanácti orgánů uvedených v hlavním seznamu, měl by být pro takovou tkáň nebo orgán aplikován váhový faktor 0,025 a pro průměrnou dávku ostatního zbytku těla, tak jak byl vymezen výše, pak váhový faktor 0,025.

1.2 Další veličiny

Kolektivní efektivní dávka - součet efektivních dávek všech jednotlivců v určité skupině,

Úvazek ekvivalentní dávky $H_T(\tau)$

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt ,$$

t_0 je čas příjmu radionuklidu, τ je doba ozařování orgánu (tkáně) T , není-li určena, bere se $\tau=50$ let pro dospělé a $\tau=70$ let pro děti, $\dot{H}_T(t)$ je- příkon ekvivalentní dávky v orgánu (tkáni) T v čase t . **Vyjadřuje ozáření orgánu nebo tkáně T po příjmu radionuklidu.**

Úvazek efektivní dávky $E(\tau)$,

$$E(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{E}(t) dt = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \sum_T w_T \dot{H}_T(t) dt = \sum_T w_T \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt = \sum_T w_T H_T(\tau)$$

(pokud se uvažuje $\tau = \text{nekonečno}$, pak se jedná o úplný úvazek ekvivalentní resp. efektivní dávky), **vyjadřuje ozáření celého těla po příjmu radionuklidu.**

Dávkový ekvivalent H

Součin absorbované dávky v uvažovaném bodě tkáně a jakostního činitele Q uvedeného vyjadřujícího rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření. Hodnoty Q plní stejnou funkci jako hodnoty radiačního váhového faktoru w_R (viz definice ekvivalentní dávky), který, na rozdíl od jakostního činitele Q , zohledňuje i další okolnosti ozáření (např. orientaci těla vůči směru záření). Z tohoto důvodu nejsou hodnoty Q a w_R zcela identické.

Příloha č. 5 vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.

Tabulka č. 3.

Jakostní činitele Q

lineární přenos energie L [keV/ μm]	jakostní činitel $Q(L)$
méně než 10	1
10 až 100	$0,32 \cdot L^{-2,2}$
více než 100	$300 \cdot L^{-0,5}$

Konvenční střední hodnoty jakostního činitele

druh záření	Q (střední hodnota)
fotony gama nebo X s energií > 30 keV	1
záření beta tritia	2
neutrony, protony, těžké ionty, částice alfa	25

Osobní dávkový ekvivalent $H_p(d)$

je dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v hloubce tkáně d .

V radiační ochraně jsou nejdůležitější osobní dávkové ekvivalenty v hloubce 0,07 mm (tzv. mělký) a v hloubce 10 mm (tzv. hluboký), ve kterých jsou stanoveny odvozené limity ozáření (viz část 2.4 Princip limitování ozáření), protože základní limity jsou stanoveny ve veličinách (efektivní dávka, ekvivalentní dávka), jež nejsou přímo měřitelné.

Fotonový dávkový ekvivalent

Fotonový dávkový ekvivalent (FDE) je veličina radiační ochrany, která zjednodušujícím způsobem vyjadřuje riziko ozáření fotony gama nebo X (jakostní činitel je roven 1), protože se konvenčně předpokládá, že nezávisí na jejich energii. Fotonový dávkový ekvivalent se vždy vztahuje ke vzduchu (obdobně jako expozice) a vyjadřuje se, stejně jako dávkový ekvivalent, v jednotkách (Sv). Mezi expozicí X a FDE platí vztah

$$FDE \text{ (Sv)} = 2,58 \cdot 10^{-6} \cdot X \text{ (C/kg)} = 0,01 \cdot X \text{ (R)}$$

Přírůstek příslušné veličiny za jednotku času nazýváme **příkonem** takové veličiny, např. příkon efektivní dávky, příkon fotonového dávkového ekvivalentu a pod.

Příklady:

Při předozadní projekci rtg vyšetření žaludku (100 kV, 3 mm Al, dopadová dávka 10 mGy) byly výpočtem stanoveny následující absorbované dávky v nejvíce exponovaných orgánech v (mGy): žaludek 4,2, jícen 0,15, povrch kostí 0,14, kůže 0,13, játra 0,12.

Stanovte ekvivalentní dávky v uvedených orgánech a vypočítejte efektivní dávku.

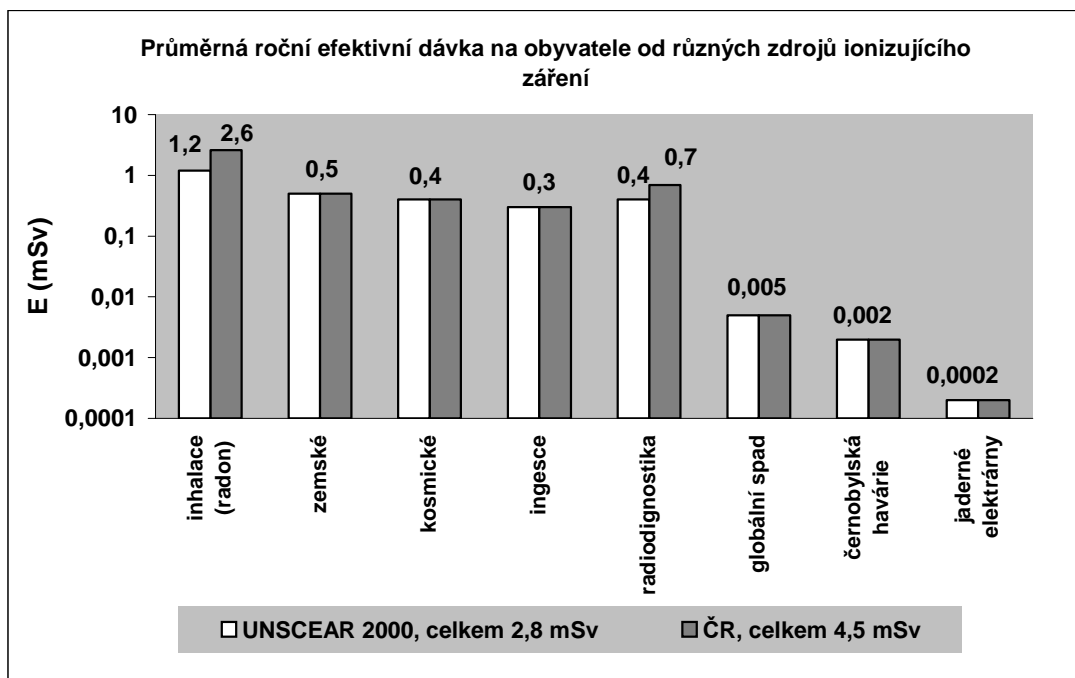
Řešení:

Pro fotonové záření je radiační váhový faktor $w_R=1$, ekvivalentní dávky v (mSv) v uvedených orgánech se číselně rovnají absorbovaným dávkám v (mGy).

Efektivní dávku vypočteme jako součet součinů příslušných tkáňových váhových faktorů pro dané orgány a ekvivalentní dávky v orgánu, čili postupně:

$$E=0,12.4,2+0,05.0,15+0,01.0,14+0,01.0,13+0,05.0,12=0,52 \text{ mSv.}$$

Grafické vyjádření průměrné roční efektivní dávky (zahrnuje jak efektivní dávky z vnějšího ozáření, tak úvahy efektivní dávky z vnitřního ozáření) od různých přírodních i civilizačních zdrojů ionizujícího záření:



Na území ČR se je střední hodnota příkonu fotonového dávkového ekvivalentu ve výšce 1m nad zemí (přírodní povrch, zahrnuje zemskou i kosmickou složku záření) 0,10 $\mu\text{Sv/h}$. Vypočítejte tomu odpovídající roční efektivní dávku od vnějšího ozáření (uvažujte cca 9000 hod/rok a zohledněte, že efektivní dávka činí pouze 70% z fotonového dávkového ekvivalentu).

Řešení:

$$E=0,10.9000.0,7=630 \mu\text{Sv} .$$

2. ZÁKLADNÍ PRINCIPY RADIAČNÍ OCHRANY

Text této kapitoly uvádí základní principy radiační ochrany publikované v Doporučení ICRP č. 103/2007. Zároveň je vždy uvedeno zakotvení principů radiační ochrany v české legislativě.

2.1 Typy expozičních situací

V prostředí přírodních a umělých zdrojů ionizujícího záření je mnoho jednotlivců je exponováno několika typům zdrojů. Na příklad většina pracovníků, kteří jsou exponováni zdrojům záření při práci, jsou exponováni také radonu v pracovním prostředí a regulovatelným přírodním zdrojům jako je radon v bytech, a dále lékařskému ozáření jako pacienti.

Každý zdroj, nebo skupina zdrojů může být často posuzována samostatně. Je potom nutné zvážit ozáření všech jednotlivců exponovaných tomuto zdroji nebo skupině zdrojů. Tento postup se nazývá „posouzení ve vztahu ke zdroji“. Každý jednotlivec je však výsledně ozařován z několika zdrojů, takže je nutný ještě druhý způsob hodnocení. Ten začíná u jednotlivce a bere

v úvahu všechny zdroje způsobující ozáření tomuto jednotlivci. Toto hodnocení se nazývá „posouzení ve vztahu k jednotlivci“.

Všechny myslitelné expozice zdrojům ionizujícího záření mohou být rozděleny do **třech typů expozičních situací**:

- **plánované situace** - každodenní situace zahrnující plánované operace se zdroji včetně jejich likvidace, uložení radioaktivního materiálu a rekultivace dříve zabraného území; provozní činnosti (practices),
- **nehodové situace** - neočekávané situace které se vyskytnou při provádění činností a které vyžadují bezodkladné opatření, nehodové situace mohou vzniknout při provozních činnostech,
- **existující expoziční situace** - expoziční situace, které už existují, když se rozhoduje o jejich regulaci, včetně ozáření z přírodního pozadí a následků minulých činností.

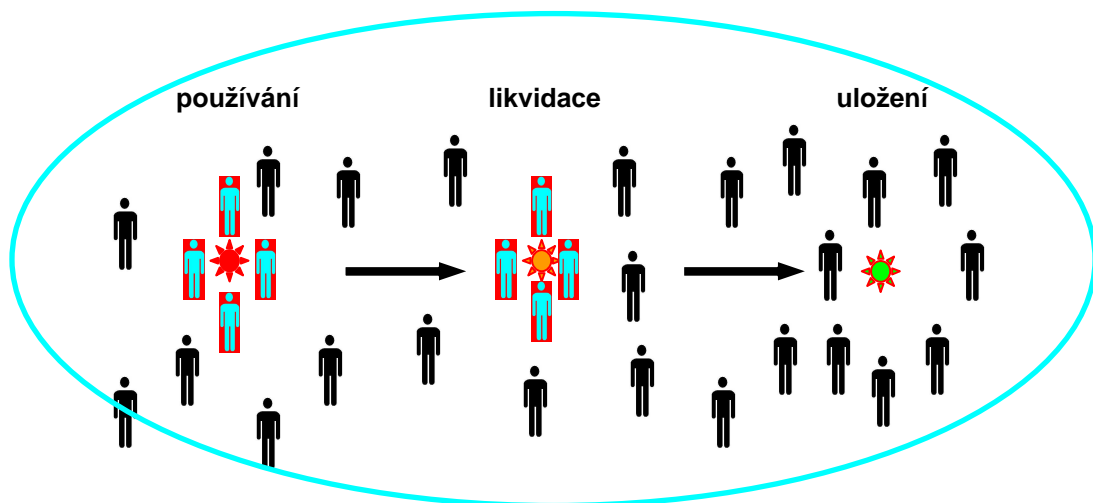


Schéma znázorňující expoziční situace
(jako události v čase a prostoru při používání zdrojů záření)

Protože provozní činnosti (practices) mohou dát vznik plánovaným, nehodovým nebo existujícím expozičním situacím, nahrazují uvedené tři typy expozice dříve používané kategorie, tj. činnosti (practices) a zásahy (interventions).

2.2 Kategorie expozic

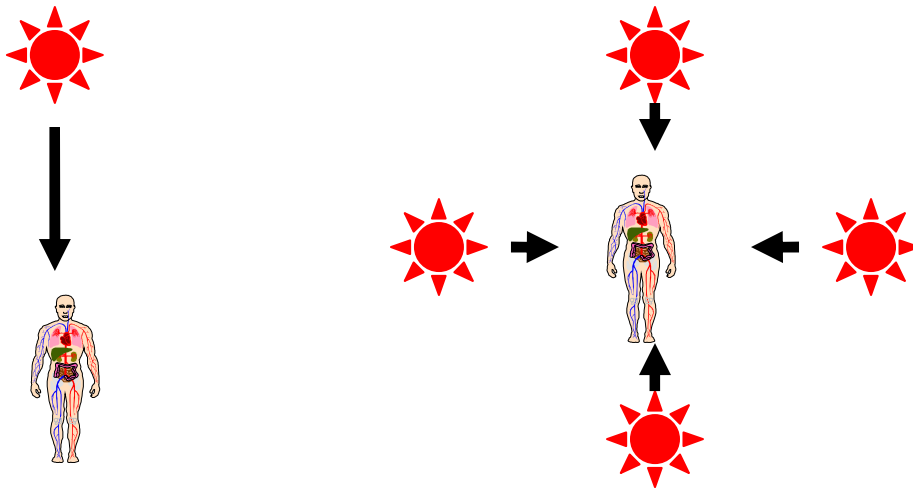
- **profesní expozice** (profesionální expozice, *occupational exposure*) – veškerá expozice pracovníků v důsledku jejich práce, osoby vystavené profesní expozici = *radiační pracovníci* - kategorie A a B):
Pracovníky kategorie A jsou radiační pracovníci, kteří by mohli obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv ročně nebo ekvivalentní dávku vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny; ostatní radiační pracovníci jsou pracovníky kategorie B.
- **lékařská expozice pacientů** (*medical exposure*) - ozáření pacientů při diagnostických, screeningových nebo léčebných výkonech, ozáření je zde záměrné a děje se pro přímý prospěch pacienta.
- **expozice obyvatel** (*public exposure*) - zahrnuje všechny expozice mimo profesní a mimo lékařské expozice pacientů, včetně ozáření plodu těhotné radiační pracovnice nebo těhotné pacientky při lékařském radiologickém výkonu.

2.3 Úrovně ochrany

Primární důležitost v ochraně má přístup vztahovaný ke zdroji, neboť opatření zajišťující ochranu skupiny osob z tohoto zdroje se může uskutečnit právě u jednotlivého zdroje. **Ochrana**

ve vztahu k jednotlivému konkrétnímu zdroji se uskutečňuje použitím **dávkových optimalizačních mezí** (constraints) v procesu optimalizace (viz dále).
Ochrana jednotlivce ze všech kontrolovaných zdrojů v rámci pouze jedné kategorie expozice v plánovaných situacích se uskutečňuje **limitováním dávk** (viz dále).

Schematické znázornění úrovní ochrany:

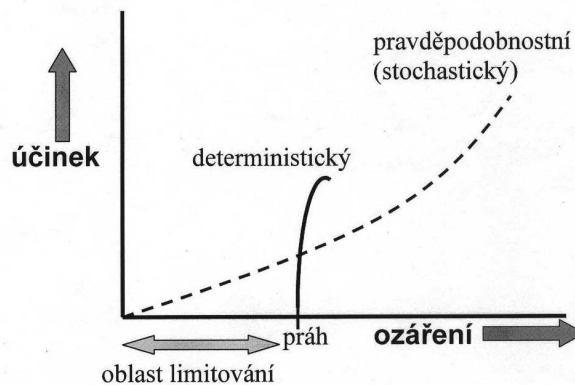


ochrana **k jednotlivému zdroji** v plánovaných, nehodových nebo existujících situacích **optimalizačními mezemi**

ochrana ze všech kontrolovaných zdrojů v plánovaných situacích

dávkovými limity

2.4 Principy radiační ochrany



Cíl (smysl) radiační ochrany vychází ze současných poznatků o účincích ionizujícího záření. **Cílem radiační ochrany je vyloučit deterministické účinky záření a riziko stochastických účinků udržovat na rozumně přijatelné nízké úrovni.**

Dosažení uvedeného cíle je dosahováno uplatňováním následujících **principů radiační ochrany:**

- princip zdůvodnění
- princip limitování
- princip optimalizace
- zajištění bezpečnosti zdrojů

2.4.1 Princip zdůvodnění (justifikace):

Kterékoliv rozhodnutí, které mění radiační expoziční situaci, např. uvedením nového zdroje záření nebo snižováním existující expozice, mělo by způsobit více užtku než škody, tj. přinést individuální nebo společenský přínos, který je větší než újma, kterou způsobuje.

Existují dva odlišné přístupy k uplatňování principu zdůvodnění v situacích týkajících se profesní expozice a expozice obyvatel, které záleží na tom, zda zdroje mohou být přímo pod kontrolou nebo ne: První přístup je užíván při zavádění plánovaných situací, kde radiologická ochrana je plánována předem a kde nezbytná opatření mohou být provedena u zdroje, druhý přístup je užíván tam, kde expozice mohou být usměrňovány především opatřením modifikujícím expoziční cesty a nikoli přímým působením na zdroj. Hlavními příklady jsou existující expoziční situace a nehodové situace.

V obou uvedených případech odpovědnost posoudit zdůvodnění obvykle připadá vládě nebo vládním orgánům, aby se zajistil úhrnný přínos v nejširším smyslu pro společnost a tedy nikoli pro každého jednotlivce.

Specifické je zdůvodnění lékařská expozice pacientů, jež vyžaduje odlišný a propracovanější přístup. Lékařské použití záření je činností (radiologickou praxí), která má být zdůvodněna jako kterékoliv jiná plánovaná situace, i když zdůvodnění spočívá častěji na odborné profesi než na vládě. V lékařství jsou tři úrovně zdůvodnění:

- (1) použití záření je přijímáno jako prospěšné pro pacienta a jeho zdůvodnění se nyní pokládá za prokázané;
- (2) konkrétní procedura se specifickým zaměřením je definována a zdůvodněna;
- (3) aplikace příslušné procedury individuálnímu pacientovi je zdůvodněna.

Základním cílem lékařských expozic je působit více dobra než škody pacientovi, vedlejší význam se příkládá radiační újmě z expozice radiologického personálu a jiným jedincům. Odpovědnost za zdůvodnění aplikace konkrétní procedury připadá příslušným praktikujícím lékařům.

V atomovém zákoně je princip zdůvodnění uzákoněn povinností: „Každý, kdo využívá jadernou energii nebo provádí činnosti vedoucí k ozáření nebo zásahy k omezení přírodního ozáření nebo ozáření v důsledku radiačních nehod, musí dbát na to, aby toto jeho jednání bylo odůvodněno přínosem, který vyváží rizika, která při těchto činnostech vznikají nebo mohou vzniknout.“

Zdůvodnění činnosti (příklad pro lékařské ozáření, § 60 vyhláška č. 307/2002 Sb.):

Lékařské ozáření jednotlivých osob se odůvodňuje očekávaným individuálním zdravotním prospěchem pacienta. V případě preventivní péče, včetně vyhledávacích vyšetření, je lékařské ozáření možné uskutečnit pouze, pokud je zdůvodněno očekávaným přínosem pro jedince, u něhož bude nemoc odkryta, s uvažováním možnosti léčebného ovlivnění nemoci. V některých případech může být důvodem vyhledávacích vyšetření ochrana skupin obyvatelstva. Do procesu odůvodnění lékařského ozáření musí být v souladu s principy klinické odpovědnosti zapojen jak indikující lékař, tak aplikující odborník, kteří

- a) *vždy vezmou v úvahu účinky, přínosy a rizika dostupných jiných metod, které vedou k témuž cíli, avšak nezahrnují ozáření ionizujícím zářením,*
- b) *před každým použitím zdroje ionizujícího záření k lékařskému ozáření zjistí u pacienta předchozí významné aplikace radionuklidů a ionizujícího záření, které by mohly mít význam pro uvažované vyšetřování nebo léčbu; u žen v reprodukčním věku zjistí možnost těhotenství nebo kojení dítěte; tyto údaje zaznamenají do zdravotnické dokumentace pacienta,*
- c) *u těhotných žen provedou vyšetření spojené s ozářením pouze v neodkladných případech nebo z důvodů porodnické indikace; přitom je nezbytné vždy zvlášť pozorně zvažovat nutnost získání požadované informace s pomocí použití zdrojů ionizujícího záření a volit*

jen takovou techniku, která zajistí maximální ochranu plodu; u kojících žen musí být při nukleárně–medicínském vyšetření věnována obdobná pozornost odůvodnění a posouzení jeho naléhavosti.

2.4.2 Princip limitování dávek:

V plánovaných situacích celková dávka kterémukoliv jednotlivci ze všech kontrolovatelných zdrojů by neměla překročit příslušné limity specifikované Komisí.

Jedná se o princip vztahovaný k jednotlivcům. Dávkové limity se neuplatňují v lékařské expozici pacientů, v nehodových situacích a při existujících expozičních situacích. Při profesní expozici se dávkové limity uplatňují v situacích určených regulačním orgánem.

Uplatnění dávkových limitů, dávkových optimalizačních mezí a referenčních úrovní v radiační ochraně pro jednotlivé kategorie ozáření je znázorněno v následující tabulce.

expoziční situace	profesní ozáření	ozáření obyvatel	lékařské ozáření
plánovaná	dávkový limit dávková optimalizační mez	dávkový limit dávková optimalizační mez	diagnostické referenční úrovně
nehodová	referenční úroveň	referenční úroveň	NA
existující	NA	referenční úroveň	NA

NA - není aplikovatelné (použitelné)

V atomovém zákoně je princip limitování uzákoněn povinností: „Každý, kdo provádí činnosti vedoucí k ozáření, je povinen omezovat ozáření osob tak, aby celkové ozáření způsobené možnou kombinací ozáření z činností vedoucích k ozáření nepřesáhlo v součtu stanovené limity.“

System limitů pro omezování ozáření (§ 18 až § 22 vyhláška č. 307/2002 Sb.) je zajištěn stanovením limitů ozáření, odvozených limitů a autorizovaných limitů.

Limity ozáření jsou závaznými kvantitativními ukazateli pro celkové ozáření z radiačních činností, jejichž překročení není ve stanovených případech přípustné. Dělí se na :

obecné limity (vztahují se na celkové ozáření z radiačních činností=činnosti při využívání umělých i přírodních zdrojů záření, nevztahují se na profesní, lékařské a havarijní ozáření),

limity pro radiační pracovníky (limity pro profesní ozáření, tj. ozáření v přímé souvislosti s výkonem práce),

limity pro učně a studenty (od 16 do 18 let věku).

limitovaná veličina	obecný limit	limit pro radiační pracovníky	limit pro učně a studenty
součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření	1 mSv/rok	100 mSv/5 roků 50 mSv/rok	6 mSv/rok
ekvivalentní dávka v oční čočce	15 mSv/rok	150 mSv/rok	50 mSv/rok
průměr. ekvivalentní dávka v 1cm ² kůže	50 mSv/rok	500 mSv/rok	150 mSv/rok
ekvivalentní dávka v prstech až předloktí a v chodidlech až po kotníky	-	500 mSv/rok	150 mSv/rok

Odvozené limity jsou pomocnými kvantitativními ukazateli, vyjádřenými v měřitelných veličinách a sloužícími ve vybraných případech k prokazování, že limity pro radiační pracovníky nebyly překročeny:

ozáření	limitovaná veličina	odvozený limit
zevní	$H_p(0,07)$ – osob. dávk. ekv. v hloubce 0,07 mm	500 mSv/rok
	$H_p(10)$ - osob. dávk. ekv. v hloubce 10 mm	20 mSv/rok
vnitřní	příjem radionuklidů požitím	podíl 20 mSv a konverzního faktoru h_{ing} pro příjem daného radionuklidu požitím
	příjem radionuklidů vdechnutím	podíl 20 mSv a konverzního faktoru h_{inh} pro příjem daného radionuklidu vdechnutím
ozáření produkty přeměny radonu	roční příjem ekvivalentní aktivity radonu	3 MBq
	latentní energie produktů přeměny radonu	17 mJ
	expozice produktům radonu	$2,5 \text{ MBq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$
	celoroční průměrná ekvivalentní objemová aktivita radonu	$1260 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
ozáření směsí dlouhodobých radionuklidů emitujících záření alfa uran-radiové řady	příjem vdechnutím za kalendářní rok	1850 Bq

Pro současné zevní a vnitřní ozáření musí platit:

$$H_p(0,07) \leq 500 \text{ mSv} \text{ a } H_p(10) + \sum h_{j,inh} I_{j,inh} + \sum h_{j,ing} I_{j,ing} \leq 20 \text{ mSv},$$

kde $I_{j,inh}$, popř. $I_{j,ing}$ je roční příjem jednotlivého radionuklidu vdechnutím, popř. požitím, $h_{j,inh}$, popř. $h_{j,ing}$ je konverzní faktor pro příjem jednotlivého radionuklidu vdechnutím, popř. požitím

Autorizovanými limity jsou závazné kvantitativní ukazatele stanovené v příslušném povolení pro jednotlivou radiační činnost nebo jednotlivý zdroj ionizujícího záření (zpravidla jako výsledek optimalizace radiační ochrany).

2.4.3 Princip optimalizace ochrany:

Ke zdroji vztahený proces směřující k udržování individuálních dávek, počtu exponovaných lidí a pravděpodobnosti, že k expozici dojde tam, kde to není jisté, na úrovni tak nízké jak je to rozumně dosažitelné pod příslušnými dávkovými optimalizačními mezemi s uvážením ekonomických a společenských faktorů.

Optimalizace ochrany má zajistit výběr nejlepší alternativy ochrany za panujících okolností, tj. maximalizovat rozpětí mezi užitekem a škodou.

Princip optimalizace ochrany a optimalizačních mezí je ústřední v systému ochrany vztahujícím se ke všem třem typům expozičních situací: plánovaným, nehodovým a existujícím. Tento princip byl uplatněn velmi úspěšně v plánovaných situacích (konkrétně v provozních činnostech) a záměrem Komise je rozšířit tuto zkušenost na ostatní dva typy expozičních situací.

Optimalizace se musí uplatňovat kontinuálním cyklickým procesem, který zahrnuje

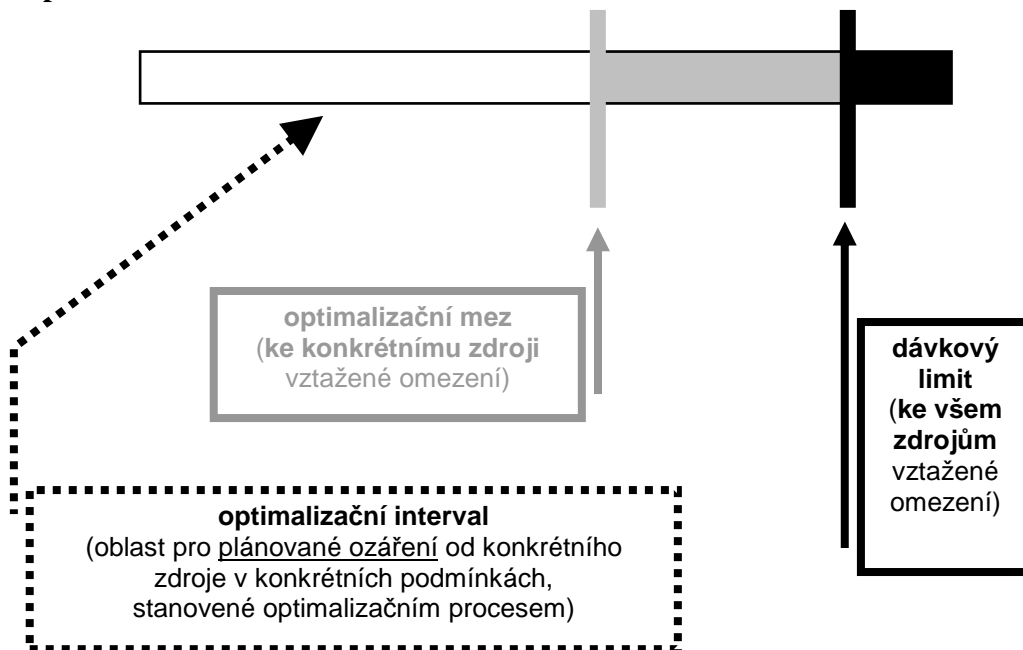
1. vyhodnocení expoziční situace, aby se zjistila potřeba akce (vytvoření rámce postupu);
2. zvolení příslušné hodnoty optimalizační meze;

3. identifikace možných alternativ ochrany k udržení expozic tak nízkých jak je rozumně dosažitelné;
4. výběr nejlepší možnosti za panující situace s uvážením optimalizačních mezí;
5. prosazení vybrané alternativy prostřednictvím efektivního optimalizačního programu;
6. pravidelná posouzení expoziční situace s cílem vyhodnotit zda převládající okolnosti vyžadují provedení nápravných opatření;
7. posouzení jak se vyhnout nehodám a jiným potenciálním expozicím při plánovaných situacích.

Optimalizační meze (constraints)

Nezákladnější vodítko ochrany je ke zdroji vztahené omezení ozáření jednotlivce vyjádřené efektivní dávkou. Pro plánované expoziční situace je nazýváno dávkovou optimalizační mezí (dose constraint) pro nehodové nebo existující expoziční situace je nazýváno referenční úroveň (reference level).

Optimalizační dávkové meze pro plánované situace představují základní úroveň ochrany pro plánovanou provozní činnost (practice). Tyto optimalizační meze budou vždy nižší než příslušné dávkové limity. V průběhu plánování operace bude zajištěno, že příslušný zdroj nezpůsobí dávky přesahující optimalizační mez; **optimalizace ochrany stanoví dávku záření pod optimalizační mezí.**



Komise vychází z předpokladu o lineárním vztahu mezi dávkou záření a rizikem rakoviny nebo dědičných účinků v exponovaných orgánech nebo tkáních a je názoru, že pro účely radiační ochrany se tento předpoklad aplikuje až do jednorázových nebo ročních dávek okolo 100 mSv. Proto maximální hodnota pro optimalizační mez by měla být 100 mSv realizovaných buďto jednorázově nebo v průběhu roku.

Doporučená pásma optimalizačních mezí a referenčních úrovní

(specifikována jako prospektivní/plánované přídatné individuální dávky)

pod 1 mSv

Odpovídá situacím, kde jednotlivci obdrží expozice – obvykle plánované – které jim nepřinášejí přímý přínos, ale je zde prospěch pro společnost. Klasickým příkladem je expozice jednotlivých obyvatel z plánované provozní činnosti (practice). Optimalizační meze v tomto pásmu by byly zvoleny pro situace kde existuje povšechná informovanost i sledování životního prostředí nebo

monitorování nebo příslušné odhady, a kde jednotlivci mohou obdržet poučení, ale nikoli proškolení. Odpovídající dávky by představovaly jen nepodstatné zvýšení nad přírodní pozadí a byly by alespoň o dva řády nižší než maximální hodnota pro optimalizační mez, takže by poskytovaly přísnou úroveň ochrany.

od 1 do 20 mSv

Uplatňuje se za okolností, kde jednotlivci mají přímý přínos z nějaké expoziční situace ale nikoli nutně ze samotné expozice nebo zdroje expozice.

Optimalizační meze se v tomto pásmu často ustanovují tam, kde existuje individuální sledování nebo monitorování či odhad dávek, a kde jednotlivci profitují z průpravy a poučení. Příkladem je soubor optimalizačních mezí pro profesní expozici v plánovaných situacích. V případě havárie by ho tohoto pásma spadaly protiopatření jako je ukrytí a jodová profylaxe.

od 20 do 100 mSv

Odpovídá neobvyklým a často krajním situacím, kde opatření ke snížení expozice by mohla být rušivá nebo kde zdroj nemůže být ovládnán. Opatření ke snížení expozice při radiačních haváriích jsou hlavním příkladem situace tohoto typu, avšak do tohoto pásma mohou patřit i expoziční situace s abnormálně vysokými úrovněmi přírodního pozadí. Pozornost je třeba věnovat snižování dávek.

Optimalizace ochrany je dopředu orientovaná iterativní metoda směřující k zábraně expozic dříve než k nim dojde. Je to proces kontinuální, zohledňující jak technický tak i socioekonomický pokrok a vyžaduje jak kvalitativní, tak i kvantitativní uvažování.

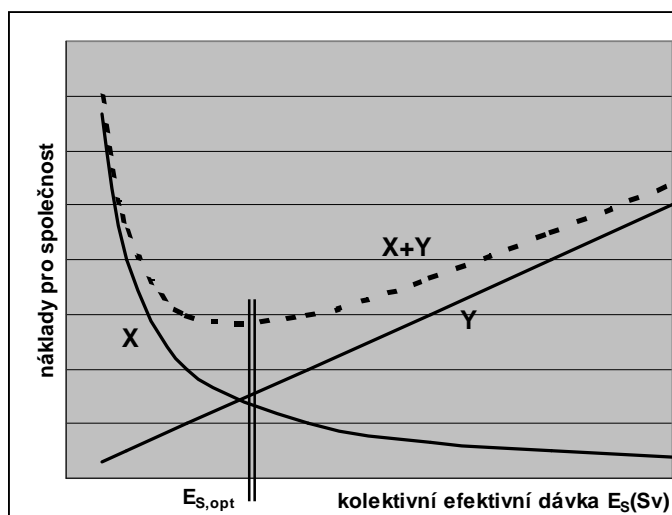
Optimalizace je způsob myšlení neustále zkoumající, zda se ve stávající situace postupovalo nejlépe a zda se pro snížení dávky učinilo všechno co je rozumné. Optimalizace také vyžaduje zaujetí pro věc na všech úrovních ve všech dotčených organizacích a také přiměřené postupy a zdroje.

Všechny aspekty optimalizace nemohou být podchyceny předpisy; optimalizace je spíše závazkem používat její prostředky než dospět k určitým výsledkům. Až na případy porušení předpisů není úlohou příslušných orgánů soustředit se na konkrétní výsledek řešení dané situace, ale spíše na metody, postupy a způsoby rozvažování. Je třeba dosáhnout otevřeného dialogu mezi orgánem dozoru a vedením provozu a úspěch optimalizace bude silně záležet na kvalitě tohoto dialogu.

V atomovém zákoně je princip optimalizace uzákoněn povinností: „*Každý, kdo využívá jadernou energii nebo provádí činnosti vedoucí k ozáření nebo provádí zásahy k omezení přírodního ozáření nebo ozáření v důsledku radiačních nehod, je povinen dodržovat takovou úroveň jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, fyzické ochrany a havarijní připravenosti, aby riziko ohrožení života, zdraví osob a životního prostředí bylo tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout při uvážení hospodářských a společenských hledisek.*“

Optimalizace radiační ochrany metodou analýzy nákladů a přínosů

Metoda analýzy nákladů a přínosů je jednou z metod, kterou lze použít při optimalizaci radiační ochrany, pokud jsou k dispozici potřebné údaje o plánovaných nákladech a přínosech.



X - náklady na ochranu

Y - náklady (škody) ze zdravotní újmy v důsledku ozáření

Ochrana je optimalizována, pokud celkové náklady pro společnost ($X+Y$) jsou minimální, tj. pro kolektivní efektivní dávku $E_{S, opt}$.

Čistý společenský přínos činnosti spojené s ozářením lze vyjádřit

$$B = V - (P + X + Y),$$

kde V je hrubý společenský přínos, P jsou náklady na činnost (V a P nejsou, na rozdíl od X a Y , funkcí kolektivní efektivní dávky).

Optimalizovaná kolektivní efektivní dávka $E_{S, opt}$ je pak nalezena z podmínky, že pro $E_{S, opt}$ musí platit

$$(dX/dS) + (dY/dS) = 0$$

K vyjádření finanční ztráty pro společnost v důsledku ozáření je třeba znát tzv. finanční ekvivalent jednotky kolektivní efektivní dávky („cena jednoho Sv kolektivní dávky“). Stanovuje se obvykle jako společenská finanční ztráta vyplývající z rizika stochastických účinků a důsledku předčasné smrti. V ČR je současně stanoven (vyhl. č. 307/2002 Sb., § 17 odst. 3) pro různé způsoby ozáření hodnotou 0,5 až 5 mil. Kč/Sv:

- 0,5 mil. Kč/Sv pro radiační činnosti, kdy průměrná efektivní dávka u jednotlivce nepřesáhne jednu desetinu příslušných limitů ozáření,
- 1 mil. Kč/Sv pro radiační činnosti, kdy průměrná efektivní dávka u jednotlivce přesáhne jednu desetinu, ale nikoliv tři desetiny příslušných limitů ozáření,
- 2,5 mil. Kč/Sv pro radiační činnosti, kdy průměrná efektivní dávka u jednotlivce přesáhne tři desetiny příslušných limitů ozáření,
- 1 mil. Kč/Sv pro lékařské ozáření,
- 0,5 mil. Kč/Sv pro ozáření z přírodních zdrojů ionizujícího záření, které nejsou záměrně využívány,
- 2,5 mil. Kč/Sv pro havarijní ozáření.

Jako průkaz rozumně dosažitelné úrovně radiační ochrany lze použít tzv. **směrné hodnoty** uvedené pro řadu činností ve vyhl. č. 307/2002 Sb. Nejsou-li směrné hodnoty překročeny, lze považovat radiační ochranu za optimalizovanou a není nutné provádět optimalizační analýzu.

Např. **směrnou hodnotou pro roční efektivní dávku je 1 mSv pro radiační pracovníky a 50 μSv pro ostatní osoby.**

Pro lékařské ozáření při radiodiagnostice plní funkci směrných hodnot tzv. **diagnostické referenční úrovně**, které jsou uvedeny v Příloze č. 9 vyhlášky č. 307/2002 Sb. pro skiografii, skioskopii, tomografii, mamografii a pro nukleární medicínu.

Pravděpodobnost stochastických účinků a celková zdravotní újma v ICRP 103

Princip optimalizace vychází ze současných poznatků o pravděpodobnosti (riziku) stochastických účinků. Pravděpodobnost je vyjadřována v jednotkách (10^{-4} Sv^{-1}), což znamená počet případů na 10 000 jedinců a celotělovou dávkou 1 Sv. Jedná se o pozorované hodnoty odvozené z řady radioepidemiologických studií, z nichž je nejvýznamnější studie populace ozářené v Hirošimě a Nagasaki.

Pravděpodobnost účinku je obecně závislá na věku ozářeného jedince, proto jsou pravděpodobnosti uváděny zvláště pro dospělé pracovníky se zářením (věk 18 až 64 roků) a pro obyvatele, jimiž je rozuměna celá populace (věk 0 až 85 roků), tj. včetně pracovníků. Vyšší pravděpodobnost nádorů pro celou populaci je způsobena tím, že tato skupina zahrnuje – na rozdíl od skupiny dospělých - děti a mladistvé, u kterých je pravděpodobnost stochastických účinků obecně vyšší.

Celková zdravotní újma stochastických účinků (detriment) pak zohledňuje nejen pravděpodobnost úmrtí, ale i zkrácení života v důsledku účinku a snížení kvality života v případě léčitelných nádorů. Hodnoty celkové zdravotní újmy jako průměr pro obě pohlaví je uveden v následující tabulce:

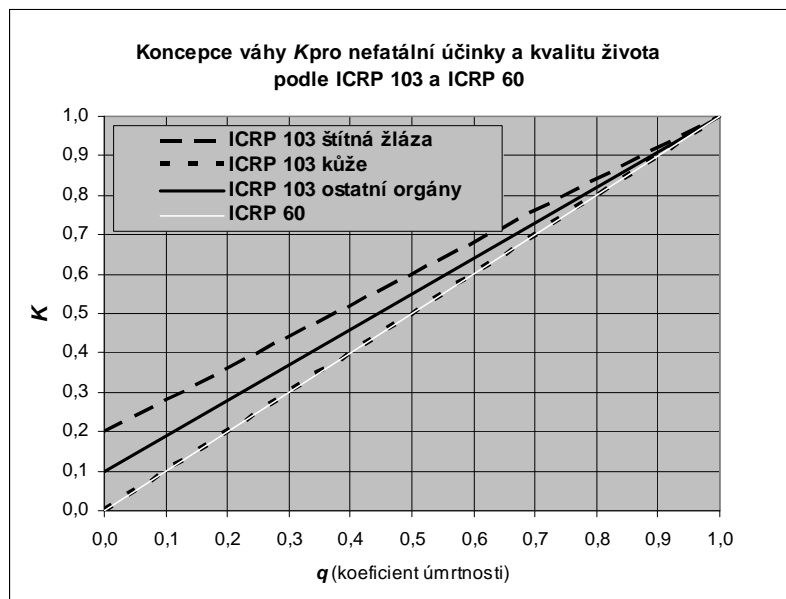
populace	celková zdravotní újma (10^{-2} Sv^{-1}) podle ICRP 103 (v závorce hodnoty ICRP 60)		
	nádory	dědičné změny	CELKEM
celá populace	5,5 (6,0)	0,2 (1,3)	5,7 (7,3)
pracovníci	4,1 (4,8)	0,1 (0,8)	4,2 (5,6)

Z tabulky je patrné snížení celkové zdravotní újmy u dědičných účinků ve zprávě ICRP 103 z r. 2007 oproti údajům uváděným ve zprávě ICRP 60 z r. 1990, ke kterému došlo novým vyhodnocením případů u japonské populace.

Výchozí veličiny a postup stanovení celkové zdravotní újmy je v následující tabulce.

Postup stanovení celkové zdravotní újmy stochastických účinků podle ICRP 103	
výchozí veličiny	R (10^{-4} Sv^{-1}) nominální koeficient rizika , tj. počet všech případů vztažených na 10 000 jedinců a 1 Sv, zahrnuje fatální a nefatální rakoviny a dědičné účinky (pro celou populaci je součet $17,15 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$)
	q (1) koeficient úmrtnosti , číslo menší než 1, vyjadřuje pravděpodobnost úmrtí v důsledku účinku
	I (1) relativní počet ztracených roků života v důsledku účinku
odvozené veličiny	$R_F = qR$ koeficient rizika fatálních účinků (pro celou populaci je součet $4,12 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$)
	$K = q_{min} + q(I - q_{min})$ koeficient nominálního rizika zohledňující kvalitu života $q_{min} = 0,1$ pro všechny orgány, s výjimkou kůže ($q_{min} = 0$) a štítné žlázy ($q_{min} = 0,2$), tj. pro kůži $K = q$ pro štítnou žlázu $K = 0,8q + 0,2$ pro ostatní orgány $K = 0,9q + 0,1$
	$Rq + R(I - q) \cdot K$ nominální riziko adjustované na letalitu a kvalitu života
	$D = I \cdot [Rq + R(I - q) \cdot K]$ celková zdravotní újma (pro celou populaci je součet $5,7 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, včetně zdravotní újmy z genetických účinků $0,2 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$)

Zohlednění snížení kvality života v případě nefatálních rakovin, tj. strádání v průběhu dlouhodobého léčení, zohledňuje koeficient K , který je nejvyšší v případě rakoviny štítné žlázy.



Relativní podíl jednotlivých orgánů DR na celkové zdravotní újmě D vyjadřuje míru citlivosti orgánu na stochastické účinky a proto je základem pro stanovení tkáňových váhových faktorů w_T . (viz část 1.). Součet všech uvažovaných w_T musí být roven 1. Doporučené hodnoty w_T pro jednotlivé orgány podle ICRP 103 jsou uvedeny v následující tabulce, pro srovnání jsou uvedeny i hodnoty z ICRP 60.

orgán	DR celá populace	w_T ICRP 103	w_T ICRP 60
ostatní orgány (celkem 14)	0,198	0,12	0,05
plice	0,157	0,12	0,12
mléčná žláza	0,138	0,12	0,05
žaludek	0,118	0,12	0,12
červ.kost.dřeň	0,108	0,12	0,12
tlusté střevo	0,083	0,12	0,12
gonády (dědič.účinky)	0,044	0,08	0,20
játra	0,046	0,04	0,05
moč.měchýř	0,029	0,04	0,05
štítná žláza	0,023	0,04	0,05
jícen	0,023	0,04	0,05
kost povrch	0,009	0,01	0,01
kůže	0,007	0,01	0,01
mozek		0,01	
slinné žlázy		0,01	
vaječníky	0,018	0,00	
celkem	1,000	1,00	1,00

Významné zvýšení hodnoty w_T nastalo u mléčné žlázy (z 0,05 na 0,12) a snížení u dědičných účinků (z 0,20 na 0,08).

Příklady:

Celková efektivní dávka (součet efektivní dávky z vnějšího ozáření a úvazek efektivní dávky z příjmu radionuklidů inhalací a ingestí) byla za roky 1986 a 1987 v důsledku vlivu černobylské havárie odhadnuta pro jednotlivce z obyvatelstva v jižních Čechách (700 tis. obyvatel) hodnotou

0,5 mSv. Použitím pravděpodobnosti stochastických účinků **odhadněte** celkový počet nádorů a počet dědičných poškození (použijte hodnoty koeficientu rizika pro nádory $5,5 \cdot 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ a pro dědičné účinky $0,20 \cdot 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$). Předpokládejte, že uvedenou efektivní dávku obdržel každý z obyvatel a že k manifestaci všech nádorů dojde do deseti let od ozáření. Rozhodněte, zda může být počet nádorů způsobených ozářením poznatelný v celkové incidenci zhoubných nádorů, která činí v ČR cca 500 nově evidovaných případů ročně na 100 tis. obyvatel (pramen ÚZIS).

Řešení:

kolektivní efektivní dávka	$E_S = 7 \cdot 10^5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 3,5 \cdot 10^2 = 350 \text{ Sv}$
odhad počtu nádorů	$350 \cdot 5,5 \cdot 10^{-2} = 20$ (zaokrouhleno)
odhad počtu dědičných účinků	$350 \cdot 0,20 \cdot 10^{-2} = 1$ (zaokrouhleno)
odhad celkem	21 případů

Celkem tedy 21 případů nádorů v průběhu 10 let, tj. příčinek $21/10 = \text{cca } 2$ případy ročně na 700 tis. obyvatel, spontánní incidence ročně na 700 tis. obyvatel je $500 \cdot 7 = 3500$ případů. Z toho vyplývá, že příčinek počtu nádorů způsobených ozářením není poznatelný.

V r. 2000 bylo v ČR provedeno celkem mamograficky vyšetřeno 242 tis. žen. Odhadněte společenské riziko vyplývající z ozáření spojeného s vyšetřením za předpokladu, že průměrná ekvivalentní dávka v prsu na 1 snímek byla 2 mSv.

(V témž roce bylo hlášeno 4871 nových případů zhoubného nádoru prsu, což představovalo 92,4 případů na 100 tis. žen. Pravděpodobnost vzniku nádoru ozářením mléčné žlázy je $0,32 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$, vztaženo na jednotku efektivní dávky).

Řešení:

Uvedená pravděpodobnost vzniku nádoru mléčné žlázy je průměrná pro celou populaci (muže i ženy), proto pro ženy je pravděpodobnost dvojnásobná, tj. $0,64 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ (pro muže je pravděpodobnost nulová). Jedno vyšetření mléčné žlázy (=obě prsa) představuje celkem 4 snímky, pro přepočítání ekvivalentní dávky na efektivní dávku předpokládáme, že při vyšetření nedošlo k ozáření ostatních orgánů. Z toho vyplývá, že počet budoucích případů v důsledku vyšetření lze odhadnout

$$2 \cdot 10^{-3} (\text{Sv/snímek}) \cdot 0,12 (\text{tkáňový váhový faktor pro mléčnou žlázu}) \cdot 4 (\text{snímek/vyšetření}) \cdot 242000 (\text{vyšetření}) \cdot 0,64 \cdot 10^{-2} (1/\text{Sv}) = 1,5.$$

Důležitá poznámka:

Na rizika používání kolektivní efektivní dávky upozorňuje Doporučení ICRP 103 v čl. 160 a 161:

„Kolektivní efektivní dávka je založena na předpokladu lineární bezprahové závislosti mezi dávkou a pravděpodobností stochastických účinků – tzv. lineární bezprahový model (LNT model).

Kolektivní efektivní dávka je nástroj pro optimalizaci, pro porovnávání radiologických technologií a postupů ochrany. Kolektivní dávka není určena jako nástroj pro epidemiologické studie. Konkrétně výpočty úmrtí na rakovinu založené na kolektivních efektivních dávkách spočívajících v triviálních expozicích velkých populací nejsou rozumné a je třeba se jim vyhnout.“

Proto dva poslední případy je třeba chápat jako **odhad** počtu případů sloužící pouze k porovnání, zda by takové počty byly poznatelné v normální incidenci případů. Odhad je postaven na předpokladu LNT modelu.

2.4.4 Zajištění bezpečnosti zdrojů:

Bezpečnostní kultura musí usměrňovat přístupy a chování při používání zdrojů. Ochrana a bezpečnost zdrojů má být zajištěna řádným řízením, dobrou technikou, systémem zabezpečení jakosti a výcvikem a vzděláváním personálu.

3. OCHRANA PŘED VNĚJŠÍM OZÁŘENÍM

3.1 Ochrana vzdáleností

Předpokládejme, že za 1 s je bodovým zdrojem do celého prostorového úhlu 4π emitováno N částic. Ve vzdálenosti r od zdroje je tedy plošná hustota částic (počet částic prošlých za 1 s jednotkovou plochou) $n=N/4\pi r^2$. Dávkový příkon \dot{D} ve vzdálenosti r je úměrný počtu částic, které projdou plochou terče P za 1 s, tudíž

$$\dot{D} \approx n \cdot P = \frac{NP4\pi}{r^2} \approx \frac{1}{r^2}.$$

Pokles se čtvercem vzdálenosti platí pouze pro bodové zdroje, tj. pouze tehdy, můžeme-li rozměr zdroje vůči vzdálenosti od něj zanedbat.

Pro fotonové gama záření jsou tabelovány tzv. „gama konstanty“ Γ , které udávají hodnotu kermového příkonu (ve vzduchu resp. ve tkáni) ve vzdálenosti 1 m od zdroje o aktivitě 1 Bq. V konkrétní vzdálenosti r (m) je pro bodový zdroj o aktivitě A (Bq) kermový příkon \dot{K} (Gy/s)

$$\dot{K} = \frac{A\Gamma}{r^2}$$

Hodnoty Γ pro některé vybrané radionuklidy:

radionuklid	Γ ve vzduchu (mGy.m ² .h ⁻¹ .GBq ⁻¹)
¹³⁷ Cs	0,084
⁶⁰ Co	0,311
¹⁹² Ir	0,129
¹³¹ I	0,054
²²⁶ Ra	0,224
²²⁶ Ra; 0,5mm Pt	0,198
⁴⁰ K	0,0203
²³⁸ U	0,0021

(ve tkáni jsou hodnoty Γ 1,096krát větší než uvedené)

Poznámka: Pokud pro fotony s energií větší než 0,3 MeV a pro ozáření zřepdu nahradíme kermový příkon ve vzduchu příkonem efektivní dávky, dopustíme se chyby menší než 10%.

3.2 Ochrana stíněním

Záření gama

K nejdůležitějším interakcím fotonů s látkou patří fotoelektrický jev a Comptonův rozptyl v elektronovém obalu atomu a tvorba elektron-pozitronových párů při interakci s elektromagnetickým polem nabitých částic. Zeslabení dávkového příkonu \dot{D}_0 materiálem tloušťky x lze zjednodušeně popsat vztahem

$$\dot{D}(x) = \dot{D}_0 B e^{-\mu_L x},$$

kde μ_L [m⁻¹] je **lineární součinitel zeslabení**, závisí na energii záření a druhu materiálu stínění, $B > 1$ je tzv. **vzrůstový faktor**, který nutno započítat při širokém svazku záření a zahrnuje příspěvek fotonů rozptýlených ve stínění (je roven efektu od všech fotonů, děleným efektem jen od primárních nerozptýlených fotonů), pro úzký svazek lze aproximovat $B=1$.

Polotloušťka $d_{1/2}$ je definována jako tloušťka materiálu, která sníží \dot{D}_0 na jednu polovinu a z výše uvedeného vztahu (pro $B=1$), vyplývá

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu_L} \cong \frac{0,693}{\mu_L}.$$

Koeficient zeslabení $K_{<=I}$ je definován jako poměr \dot{D}/\dot{D}_0 . Pro stínící vrstvu složenou z n polotlouštek platí $\dot{D} = \frac{\dot{D}_0}{2^n}$.

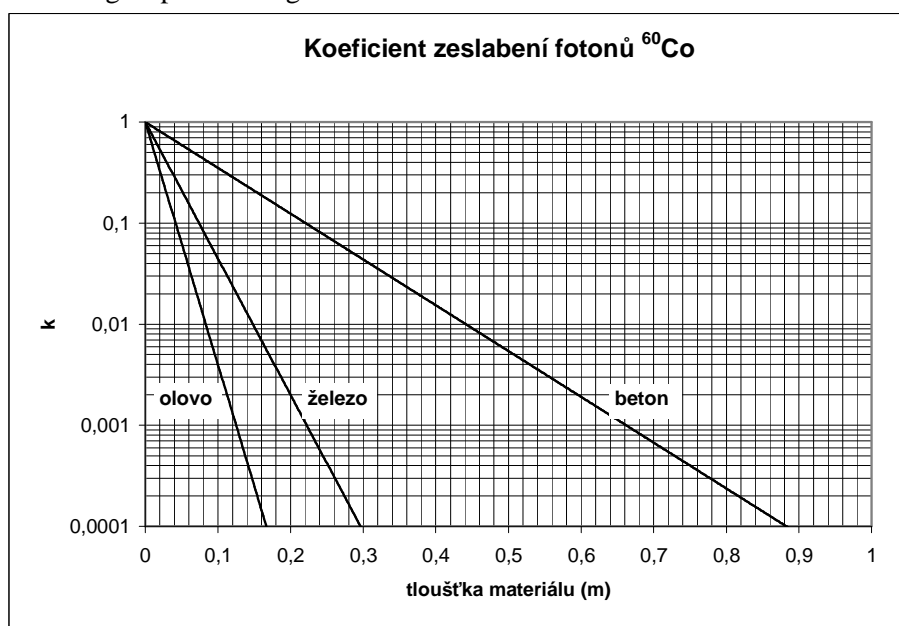
Pro **hmotnostní součinitel zeslabení** $\mu_m(\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$ platí

$$\mu_m = \frac{\mu_L}{\rho},$$

kde $\rho(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ je hustota materiálu.

Pro široké svazky existuje řada tabulek a grafů, ze kterých lze pro konkrétní případy zjistit K , $d_{1/2}$, μ_L nebo μ_m .

V grafech se výhodně používá semilogaritmické zobrazení (osa x je lineární, osa y logaritmická), ve kterém se exponenciální pokles transformuje do přímkové závislosti. Jako příklad je uveden graf pro záření gama ^{60}Co :

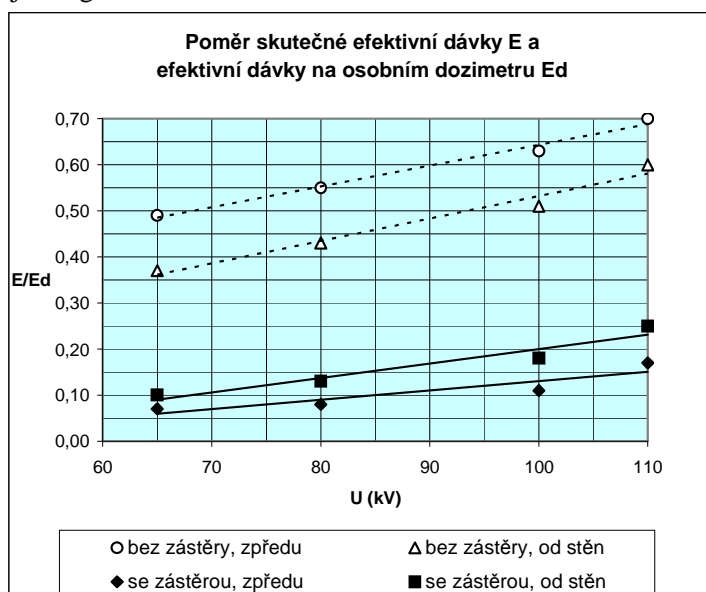


Koeficienty zeslabení pro rtg záření a různé ekvivalenty olova jsou uvedeny v následující tabulce:

napětí (kV)	50	75	100	150
ekvivalent Pb (mm)	koeficient zeslabení			
0,13	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$
0,25	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$
0,35	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$
0,40	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-2}$
0,50	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$
1		$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$

Specifickou ochranu stíněním představuje nošení ochranné zástěry, především při lékařských aplikacích. Při hodnocení ozáření z údajů osobního dozimetru (vždy nošen na referenčním místě a **na zástěře**) je třeba uvážit, že údaj dozimetru je zlomkem efektivní dávky jednotlivce krytého

zástěrou. Poměr skutečné efektivní dávky a údaje dozimetru, pro převládající směr ozáření, je uveden na následujícím grafu.



Záření alfa a beta

Záření alfa a beta obvykle nepředstavuje vážný problém při jejich stínění. Vlivem silné ionizace v elektronovém obalu záření rychle ztrácí svoji energii a v látce se absorbuje.

Dosah částic alfa R ve vzduchu v závislosti na jejich energii E lze vyjádřit empirickým vztahem

$$R_{vzduch} (mm) = 3,18 \cdot E(MeV)^{3/2}.$$

Dosah částic alfa R v látce hustoty $\rho(kg \cdot m^{-3})$ a atomové hmotnosti A lze odhadnout ze vztahu

$$R = 0,3 \frac{R_{vzduch}}{\rho} \sqrt{A}.$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že např. částice alfa s energií 4 MeV mají ve vzduchu dosah cca 25 mm a ve tkáni cca 30 μm .

Dosah částic beta je pro energie rozsahu 0,1 až jednotek MeV v rozsahu 0,1 až jednotek metru ve vzduchu, ve tkáni je dosah cca 1000krát menší.

Při stínění záření beta je však nutné pamatovat na tzv. **brzdné záření**, které je elektromagnetickým zářením vznikajícím obecně při průchodu nabitě částice (jejím urychlením) elektrickým polem. Energie brzdného záření je úměrná atomovému číslu absorbující látky a nepřímo úměrná hmotnosti pohybující se nabitě částice. Z toho vyplývá, že brzdné záření je největší při pohybu málo hmotných částic v těžších látkách. Proto se záření beta vždy stíní lehkými materiály (dřevo, plasty apod.), namísto těžších materiálů (železo, olovo), používajících pro stínění záření gama.

Příklady:

Pánové B. a Š. prováděli zásah při poruše brachyterapeutického přístroje GAMMAMED, při které zůstal zdroj Ir-192 v pracovní poloze a nebylo jej možno automaticky zasunout do krytu. Stanovte odhad efektivní dávky v důsledku zásahu, znáte-li aktuální aktivitu zdroje 370,6 GBq, průměrnou vzdálenost od zdroje 0,5 m a délku trvání operace maximálně 2,5 minuty pro oba pracovníky (pro Ir-192 je $\Gamma = 0,129 mGy \cdot m^2 \cdot h^{-1} \cdot GBq^{-1}$).

Řešení:

$$E = w_R D = w_R \dot{D} t = w_R (A \cdot \Gamma / r^2) \cdot t = 1 \cdot (370,6 \cdot 0,129 / 0,5^2) \cdot 2,5 / 60 = 8 \text{ mSv}$$

Závěr: Odhad (maximální) efektivní dávky je 8 mSv.

Poznámka: Podle filmové osobní dozimetrie byla hodnota efektivní dávky u pana Š. 5,14 mSv a u pana B.1,14 mSv.

U pracovníka došlo ke kontaminaci kůže roztokem P-32, plošná kontaminace činila 200 kBq/cm². Stanovte dávkový příkon v bazální (citlivé) vrstvě kůže, který činí asi 95% dávkového příkonu v povrchové (zrohovatělé) vrstvě kůže, víte-li, že každému jednomu elektronu, který projde za 1 s plochou 1 cm² kůže odpovídá dávkový příkon v povrchové vrstvě 1 μGy/h (P-32 je čistý beta zářič, každá přeměna jádra je spojena s emisí jednoho elektronu).

Řešení:

Aktivita vyjadřuje počet přeměn jader za 1 s, tudíž plošná aktivita a_S odpovídá počtu emitovaných elektronů za 1 s z jednoho cm², do kůže jich vstupuje polovina, tedy jedním cm² vstoupí do kůže 0,5.a_S elektronů. Dávkový příkon v bazální vrstvě D_B je tedy

$$D_B = 0,95 \cdot D_P = 0,95 \cdot 0,5 \cdot a_S \cdot 1 = 0,95 \cdot 0,5 \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 1 = 95 \text{ mGy/h}$$

Při nevhodné manipulaci se zdrojem Co-60 o aktivitě 500 GBq došlo k ozáření prstů pravé ruky ze vzdálenosti 5 cm po dobu cca 30 s. Stanovte dávku na kůži prstů a tomu odpovídající efektivní dávku (ozáření ostatních orgánů zanedbejte). Lze očekávat na prstech projev ozáření?

Řešení:

$$\Gamma = 0,341 \text{ mGy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{GBq}^{-1}, r = 0,05 \text{ m}, t = 30 \text{ s} = 1/120 \text{ h}$$

$$D = \dot{D} t = (A \cdot \Gamma / r^2) \cdot t = (500 \cdot 0,341 / 0,05^2) \cdot 1/120 = 0,6 \text{ Gy}$$

$$E = w_R \cdot w_K \cdot D = 1,0 \cdot 0,1 \cdot 0,6 = 0,006 \text{ Sv} = 6 \text{ mSv}$$

Projev očekávat nelze, protože dávka na kůži je výrazně menší než práh účinku, který je pro gama záření cca 3 Gy.

4. HODNOCENÍ RIZIKA Z VNITŘNÍHO OZÁŘENÍ

4.1 Kompartmentové modelování kinetiky radionuklidů

Kinetiku radionuklidů v těle popisujeme následujícími veličinami:

I - příjem radionuklidu (Bq), tj. aktivita která v určitém čase t₀ vstoupila do organismu,

R(t) - retence radionuklidu (Bq), tj. aktivita radionuklidu v celém těle nebo v jeho části,

E(t) - exkrece rychlost (Bq/den), tj. aktivita vyloučená z těla za časové období (hod, den, rok).

Modelově je celý organismus rozdělen na tzv. kompartmenty = vymezená část organismu, v níž je radionuklid rovnoměrně rozdělen a řídí se lineární kinetikou: Změna obsahu kompartmentu je úměrná jeho obsahu, koeficient úměrnosti není závislý na čase a nazývá se vylučovací konstantou k.

Aktivita radionuklidu v kompartmentu R(t) je pak funkcí času, pro níž platí

$$\frac{dR}{dt} = -k \cdot R,$$

s řešením $R(t) = R(0) \cdot e^{-k \cdot t}$.

Pokud se uvažuje i fyzikální rozpad, pak

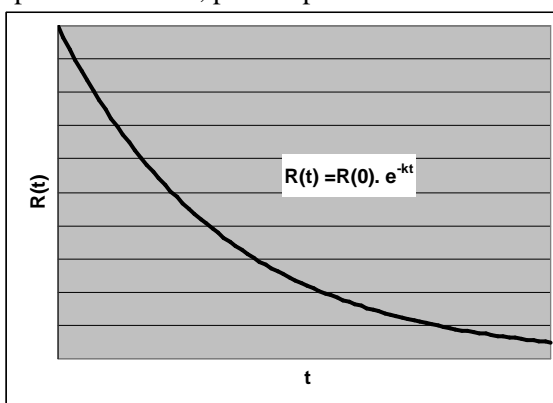
$$\frac{dR}{dt} = -k \cdot R - k_r \cdot R = -(k + k_r) \cdot R,$$

s řešením

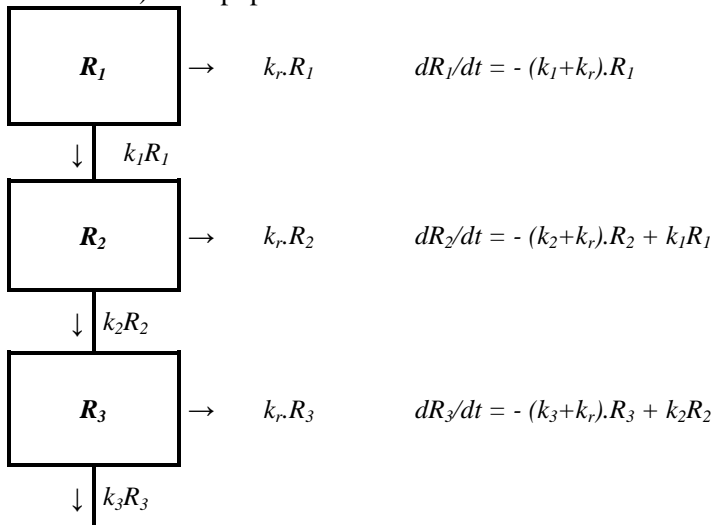
$$R(t) = R(0) e^{-(k+k_r)t} = R(0) e^{-\frac{\ln 2}{T_{EF}} t},$$

kde k_r = ln2/T_{1/2} je přeměnová (rozpadová) konstanta radionuklidu a T_{1/2} je poločas

přeměny radionuklidu, T_{EF} = (ln2)/(k+k_r) je efektivní poločas, jenž vyjadřuje dobu, za kterou poklesne aktivita v kompartmentu na jednu polovinu původní hodnoty oběma mechanismy (fyzikálním i vylučovacím). V případě, kdy k je mnohem větší než k_r, lze k_r zanedbat a efektivní poločas se pak rovná poločasu vylučování (biologickému poločasu).



Vícekompartmentové modely vystihují vazby mezi jednotlivými kompartmenty a popisují se soustavou diferenciálních rovnic, kterou je nutné řešit. Např. tříkompartmentový model (bez recirkulace) bude popsán rovnicemi



Budou-li počáteční podmínky (v $t=0$) $R_1(0)=I$ a $R_2(0)=R_3(0)=0$, tj. veškerá přijatá aktivita radionuklidu se nachází v 1. kompartmentu a ve 2. a 3. kompartmentu není zatím přítomna), pak řešení pro jednotlivé kompartmenty bude :

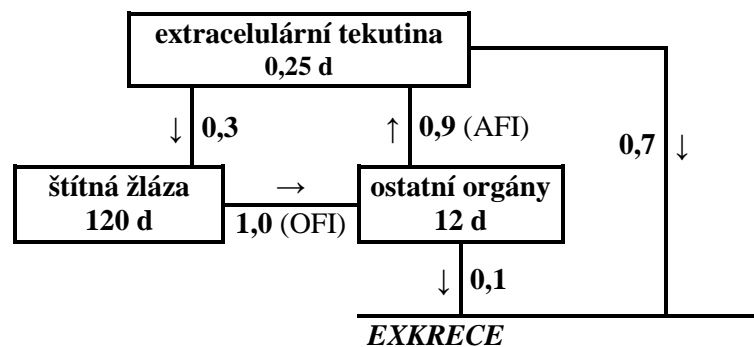
$$R_1(t) = I e^{-k_1 t} e^{-k_r t}$$

$$R_2(t) = I \left[\frac{k_1}{k_2 - k_1} e^{-k_1 t} + \frac{k_1}{k_1 - k_2} e^{-k_2 t} \right] e^{-k_r t}$$

$$R_3(t) = I \left[\frac{k_1 k_2}{(k_2 - k_1)(k_3 - k_1)} e^{-k_1 t} + \frac{k_1 k_2}{(k_1 - k_2)(k_3 - k_2)} e^{-k_2 t} + \frac{k_1 k_2}{(k_1 - k_3)(k_2 - k_3)} e^{-k_3 t} \right] e^{-k_r t}$$

4.2 Metabolismus jódu v těle

Riggsův model (příklad vícekompartmentového modelu) předpokládá, že všechny jód se po požití vstřebá do extracelulární tekutiny, ve schéma jsou udány podíly jednotlivých cest a poločasy vylučování):



OFI, AFI - organické a anorganické formy jódu

Příklad:

Využitím dat z Riggsova modelu stanovte, jaká část příjmu I (požitá aktivita) se akumuluje ve štítné žláze za 24 hodin, fyzikální přeměnu zanedbejte.

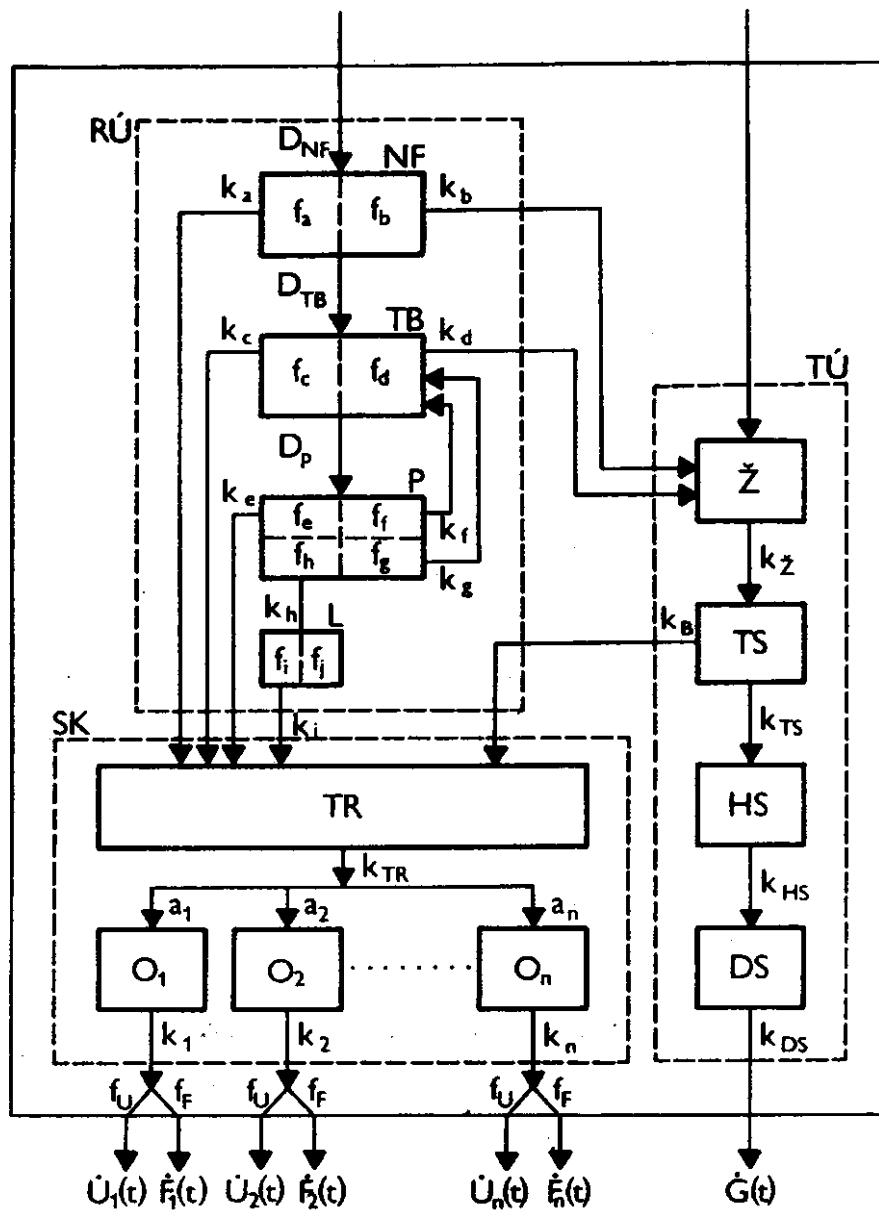
Řešení:

Vzhledem k rychlému přechodu (krátkému poločasu vylučování 0,25d) z extracelulární tekutiny (ET) do ŠŽ a relativně k tomu pomalému přechodu (dlouhému poločasu vylučování 120d) ze ŠŽ do recirkulace přes ostatní orgány, hodnotu recirkulace do ostatních orgánů za 24 hodin zanedbáme.

24 hodin=1 d představuje 4 poločasy vylučování z ET, aktivita v ET tudíž poklesne na $1/2^4=1/16$ příjmu. Zbytek $(15/16)I$ se pak rozdělí tak, že 30% přejde do ŠŽ, kde tudíž bude $0,3 \cdot (15/16)I = 0,28I$.

Za 24 hodin se tudíž ve ŠŽ akumuluje cca 28% podané aktivity jódu.

4.3 Kompartmentový model kinetiky radionuklidů pro referenčního člověka.



respirační ústrojí (RÚ):

nasofarynx (NF), tracheobronchiální strom (TB), plíce (P), lymfatické uzliny (L)

trávicí ústrojí (TÚ):

žaludek (Ž), tenké střevo (TS), horní (HS) a dolní (DS) úsek tlustého střeva

TR - transferový kompartment, O_i - orgánové kompartmenty, SK - model systémové kinetiky

D_a - depoziční frakce do kompartmentu a, k_a - vylučovací konstanta z kompartmentu a,

f_i, a_i - distribuční frakce

$\dot{U}(t), \dot{F}(t)$ - rychlost exkrece močí a stolicí, $\dot{G}(t)$ - rychlost přímé pasáže trávicím ústrojím

Z modelu pro referenčního člověka jsou pak odvozeny úvazky efektivní dávky připadající na příjem radionuklidu o jednotkové aktivitě (v jednotkách Sv/Bq) pro příjem ingescí nebo inhalací a jsou věkově strukturované. Pro inhalační příjem jsou tyto konverzní faktory navíc členěny podle rychlostí přechodu z plic do tělesných tekutin (rychle, středně a pomalu) a podle frakce přechodu z plic do trávicího ústrojí. Naleznete je např. ve vyhlášce. č. 307/2002Sb., o radiační ochraně, Příloha č. 3, tabulka č. 4 a 5.

4.4 Souhrn:

K hodnocení rizika z vnitřního ozáření je třeba znát:

- způsob příjmu - nejčastěji ingesce nebo inhalace, při poraněních spojených s kontaminací může jít i o perkutánní příjem,
- druh přijatého radionuklidu a přijatá aktivita (nebo alespoň její odhad)
- úvazek efektivní dávky připadající na příjem radionuklidu o jednotkové aktivitě,

Při nehodách doprovázených příjmem radionuklidů bývá právě nejtěžší odhadnout přijatou aktivitu. Proto za tímto účelem se považuje za nutné vždy zahájit u dotčeného jedince sběr exkrementů, jejichž aktivita pak slouží k upřesnění hodnoty příjmu. Úplnou informaci o obsahu radionuklidů v těle pak poskytne měření na celotělovém počítací.

Příklady

Pan Houbař odhadl, že v průběhu sezóny snědl cca 10 kg hub s hmotnostní aktivitou ^{137}Cs 500 Bq/kg. Vypočítejte odpovídající úvazek efektivní dávky a porovnejte ho s velikostí roční efektivní dávky od přírodních zdrojů záření, která činí 2,4 mSv.

Řešení:

úvazek efektivní dávky $E_C = I \cdot h_{ing} = m \cdot a_m \cdot h_{ing} = 10 \cdot 500 \cdot 1,3 \cdot 10^{-8} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} = 0,065 \text{ mSv}$,

kde $h_{ing} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ je konverzní faktor pro příjem ^{137}Cs ingescí (vyhl.č.307/2002Sb., Příloha č.3, tabulka č.5, pro dospělého obyvatele)

$0,065/2,4 = 0,027 = 3 \%$ ozáření z přírodních zdrojů

Stanovte odvozený limit příjmu ingescí a inhalací ^{131}I pro radiační pracovníky za předpokladu, že efektivní dávka ze zevního ozáření je zanedbatelná.

Řešení:

Konverzní faktory pro příjem ingescí a inhalací $h_{ing} = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$, $h_{inh} = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ (vyhl. č. 307/2002Sb., Příloha č.3, tabulka č.4, pro pracovníky), odvozený roční limit příjmu se rovná podílu 20 mSv a příslušného konverzního faktoru, tudíž

pro ingesci $I_{L,ing} = 20 \cdot 10^{-3} / 2,2 \cdot 10^{-8} = 909 \text{ kBq}$,

pro inhalaci $I_{L,inh} = 20 \cdot 10^{-3} / 1,1 \cdot 10^{-8} = 1818 \text{ kBq}$.

U pracovníka o hmotnosti 80 kg byla desátý den poté, co manipuloval s tritiem, zjištěna ve vzorku moči objemová aktivita tritia 100 kBq/l. Vypočítejte aktivitu příjmu tritia a úvazek efektivní dávky.

Návod: Tritium kontaminuje organismus ve formě tritiové vody HTO, která se velmi rychle rozpouští v tělní tekutině a objemová aktivita tritia v tělní tekutině je stejná s objemovou aktivitou moče. Rychlost vylučování je dána rychlostí vylučování vody z organismu. Z těchto

důvodů lze použít jednodílný model vylučování, efektivní biologický poločas tritia je 10 dnů, v těle je 60 hmotnostních % vody.

Řešení:

V desátý den po příjmu je objemová aktivita moče i tělesných tekutin stejná a rovna 100 kBq/l. Deset dnů je právě jeden efektivní poločas, v den příjmu tedy musela být objemová aktivita moče i tělesných tekutin dvojnásobná, tj. 200 kBq/l. V těle o hmotnosti 80 kg je

$0,6 \cdot 80 = 48 \text{ kg} = 48 \text{ l}$ vody, tedy příjem musel být $200 \cdot 48 \text{ kBq} = 9,6 \text{ MBq}$.

$h = 1,8 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq}$, (vyhl. č.307/2002Sb., Příloha č.3, tabulka č.4), tedy úvazek efektivní dávky je

$$E_C = 9,6 \cdot 10^6 \cdot 1,8 \cdot 10^{-11} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,17 \text{ mSv}.$$

Poznámka: Pokud by byla kontaminace moče $a(k)$ zjištěna obecně v k -tý den po příjmu, použili bychom pro výpočet objemové aktivity vody v těle v den příjmu $a(0)$ rovnici uvedenou výše jako řešení jednodílného modelu, tj.

$$a(0) = \frac{a(k)}{e^{-\frac{\ln 2}{T_{EF}}k}} = \frac{a(k)}{e^{-0,0693k}}.$$

5. PŘÍRODNÍ ZDROJE ZÁŘENÍ

5.1 Radionuklidy netvořící řady

Převážně se jedná o beta zářiče s velkým poločasem přeměny, obsažené v zemském podloží a v důsledku toho ve stavebních materiálech, v potravinách i v lidském těle. Uvedeny pouze nejzávažnější:

⁴⁰K (draslík)

Poločas $1,3 \cdot 10^9$ roků, přeměna ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + {}^0_{-1}\beta$ (89%)

${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar}$ (11%, elektron. záchyt, emise fotonu s 1461 keV)

1 g přírodního K obsahuje 0,119 mg ⁴⁰K, což představuje aktivitu cca 32 Bq. V půdě a potravinách se nacházejí desítky až stovky Bq/kg ⁴⁰K.

⁸⁷Rb (rubidium)

Poločas $5 \cdot 10^{10}$ roků, přeměna ${}^{87}_{37}\text{Rb} \rightarrow {}^{87}_{38}\text{Sr} + {}^0_{-1}\beta$

⁴⁰K a ⁸⁷Rb způsobují vnější ozáření (z podloží a stavebních materiálů) s roční průměrnou efektivní dávkou 0,15 mSv a vnitřní ozáření (ingesce potravin) cca 0,19 mSv, celkem 0,34 mSv, což je asi 1/7 z celkového ozáření z přírodních zdrojů (2,4 mSv).

Kosmogenní radionuklidy

Především ³H (tritium, poločas 12,3 r) a ¹⁴C (uhlík, poločas 5730 r), které vznikají v atmosféře působením neutronů kosmického záření na dusík:



V povrchových vodách je přírodní obsah ³H v jednotkách, max. desítkách Bq/litr.

¹⁴C využíván pro stanovení stáří biologických materiálů (tzv. radiokarbonová datovací metoda), ³H ke stanovení míry komunikace spodních vod s povrchem Země.

5.2 Radionuklidy tvořící genetické řady

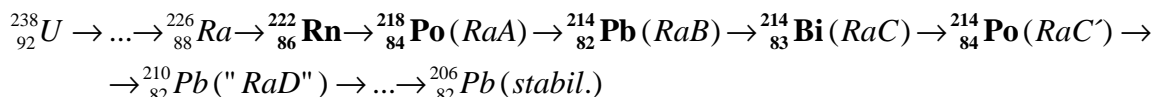
Řady: uran-radiová (od $^{238}_{92}\text{U}$)

aktiniová (od $^{235}_{92}\text{U}$)

thoriová (od $^{232}_{90}\text{Th}$)

Přírodní uran obsahuje ^{238}U (99,3%), ^{235}U (0,7%) a ^{234}U (méně než 0,001%, 4. člen uran-radiové řady).

Radiační ochranou je věnována největší pozornost uran-radiové řadě, zejména ^{226}Ra a dalšímu členu řady, kterým je radon ^{222}Rn :

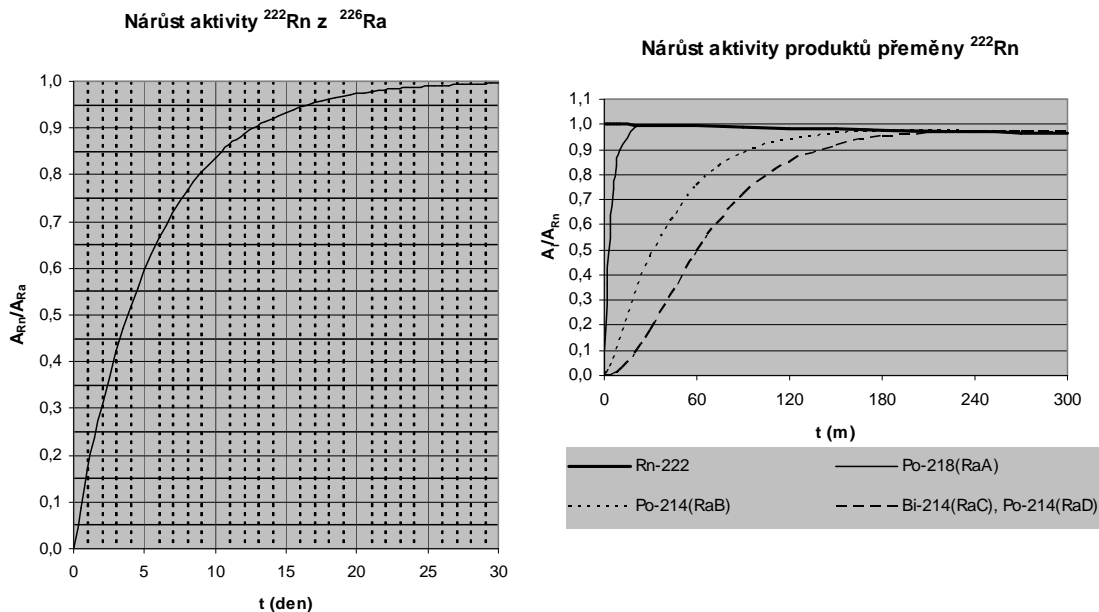


5.3 Radon ^{222}Rn , základní údaje

Radon a jeho produkty přeměny (v literatuře i názvy „rozpadové“ nebo „dceřinné“ produkty, ve schéma vyznačeny tučně) představují zvýšené riziko rakoviny plic (stochastický účinek záření), pokud jsou vdechovány. Typy měřen a odpovídající energie radonu a jeho produktů přeměny jsou uvedeny v následující tabulce (ICRP 65):

radionuklid	poločas	energie záření E (MeV) a zastoupení Y (%)					
		<i>alfa</i>		<i>beta</i>		<i>gama</i>	
		E	Y	E	Y	E	Y
^{222}Rn	3,824 d	5,49	100				
^{218}Po	3,05 m	6	100				
^{214}Pb	26,8 m			1,02	6	0,35	37
				0,70	42	0,30	19
				0,65	48	0,24	8
^{214}Bi	19,9 m			3,27	18	0,61	46
				1,54	18	1,77	16
				1,51	18	1,12	15
^{214}Po	164 μs	7,69	100				

V důsledku přítomnosti ^{226}Ra v podloží, je půdní vzduch stále dotován plynným radonem (v půdním vzduchu mohou být řádově až stovky kBq/m^3 radonu), který se následně rozpadá na produkty přeměny. Ty již nejsou plynné, ale usazují se na povrchu předmětů nebo se pohybují ve vzduchu deponovány na aerosolu. Vlivem genetické souvislosti, dlouhého poločasu přeměny ^{226}Ra (1620 r) a krátkého poločasu přeměny ^{222}Rn (3,8 d) i jeho produktů přeměny (3,05 h, 26,8 m, 19,9 m a 164 μs) se zhruba po jednom měsíci vytvoří mezi ^{226}Ra a ostatními členy radioaktivní rovnováha, kdy aktivita všech členů se rovná aktivitě mateřského radia.



Ve venkovním ovzduší se radon rychle ředí v atmosféře, objemová aktivita radonu v ovzduší nad povrchem země je max. do 20 Bq/m^3 .

Ve vnitřních prostorech (budovy) se však může hromadit a jeho obsah v ovzduší budov závisí na řadě faktorů (množství radonu v půdním vzduchu v podloží budovy, izolace základů, stupeň ventilace=větrání, rozdíl teplot uvnitř a vně budovy, atmosférický tlak atd.). Objemová aktivita radonu ve vnitřních prostorech se pohybuje od desítek do tisíců Bq/m^3 .

Zdroje radonu v budovách (v bytech a na pracovištích):

1. podloží budov (nejvýznamnější zdroj),
2. voda dodávaná do budov (pokud obsahuje radon, ten se při manipulaci s vodou - koupání, sprchování, mytí nádobí, praní apod. - uvolňuje do ovzduší; nejedná se o ingesci=pití vody, riziko z ingescce radonu je zanedbatelné vzhledem k inhalaci),
3. stavební materiály (i ty obsahují ^{226}Ra a mohou tudíž být zdrojem radonu),
4. zemní plyn dodávaný do budov (pokud obsahuje radon).

5.4 Hodnocení rizika radonu

(včetně potřebných veličin, jednotek a obvyklého značení, ICRP 65)

Objemová aktivita radonu OAR ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), aktivita (samotného) plynu radonu v jednotce objemu vzduchu.

Ekvivalentní (rovnovážná) objemová aktivita radonu EOAR ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$), rovnovážná směs radonu a jeho produktů přeměny, která má v jednotce objemu vzduchu stejnou celkovou energii záření alfa jako reálná nerovnovážná směs. (V důsledku ventilace v budovách a stálé dotace radonu nemůže prakticky existovat rovnovážná směs radonu a jeho produktů přeměny. EOAR se zavádí tudíž proto, aby se nemuselo vždy uvádět konkrétní zastoupení jednotlivých produktů přeměny radonu.)

Faktor rovnováhy F (bezrozměrný), poměr EOAR/OAR, je vždy menší než 1 (1 je roven právě v případě rovnováhy). V reálných podmínkách bytů se uvažuje $F=0,4$ až $0,5$ (nemusí však platit obecně).

Expozice produktům přeměny radonu C ($\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$), časový integrál EOAR v určitém časovém intervalu. Pokud je EOAR po celou dobu konstantní (nezávislá na čase), je to součin doby (h) a EOAR ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$).

Nejsou-li známy přesné doby pobytu uvnitř budov, uvažuje se 7000 hodin pobytu ročně uvnitř budov (doma a v práci) a 2000 hodin venku.

Pobytu 7000 hodin ročně v obydlích s OAR $100 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ odpovídá přibližně roční efektivní dávka 2 mSv . (§ 95 vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, v platném znění).

Průměrná hodnota OAR v bytovém fondu ČR je $118 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, to odpovídá ročně cca 2,4 mSv, ale jsou nacházeny i byty s hodnotami nad $400 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (odpovídá ročně více než 8 mSv). Místa s vysokým rizikem vnikání radonu do budov jsou v ČR především: oblast tzv. Středočeského plutonu (leží na rozhraní středočeského a jihočeského regionu), Třebíčský masiv, Jáchymovsko a prakticky všechny oblasti pohraničních hor.

5.5 Kinetika radonu

Časový průběh závislosti OAR v obytných prostorech závisí na mnoha parametrech (viz výše). Pro zjednodušený odhad označme:

$a(t)$ objemová aktivita radonu (OAR) ve vyšetřovaném obytném prostoru v $[\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}]$,

$\dot{R}(t)$ přísun objemové aktivity radonu do prostoru za jednotku času v $[\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}]$,

$v(t)$ ventilace místnosti, tj. kolikrát se za jednotku času obmění objem vzduchu v $[\text{h}^{-1}]$,

λ_{Rn} přeměnová (rozpadová) konstanta radonu, je rovna $7,6\cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$.

Potom změna $a(t)$ za čas

$$\frac{da}{dt} = \dot{R} - a(\lambda_{Rn} + v),$$

kde na pravé straně je zohledněn úbytek OAR fyzikálním rozpadem i ventilací.

Pokud zanedbáme λ_{Rn} proti v (v reálných obytných místnostech dochází k úbytku radonu především větráním, nikoliv jeho přeměnou) a budeme předpokládat, že přísun ani ventilace nezávisí na čase, je řešením uvedené rovnice (za okrajové podmínky, že v čase $t=0$ byla místnost plně provětrána a tudíž $a(t)=0$)

$$a(t) = \frac{\dot{R}}{v} (1 - e^{-vt}).$$

Z toho vyplývá, že po provětrání místnosti OAR exponenciálně narůstá a dosahuje limitní hodnoty \dot{R}/v . Vztah lze využít pro stanovení přísunu \dot{R} do prostoru resp. ventilace v daného prostoru. (V případě, že se nemění s časem faktor rovnováhy F , lze uvedenou závislost použít i pro EOAR.)

5.6 Legislativa v ČR postihující přírodní zdroje (výťah)

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

§ 6. ozáření z přírodních zdrojů

(1) Pokud jsou přírodní radionuklidy záměrně využívány pro jejich radioaktivní, štěpné nebo množivé vlastnosti, vztahují se na nakládání s nimi ustanovení tohoto zákona ve stejném rozsahu jako na umělé zdroje ionizujícího záření. Těžba, úprava a zpracování radioaktivních nerostů se považuje za radiační činnost.

(2) Prováděcí právní předpis stanoví pracoviště, kde může dojít k významnému zvýšení ozáření z přírodních zdrojů ionizujícího záření fyzických osob při výkonu jejich práce nebo jednotlivců z obyvatelstva v okolí stanoveného pracoviště.

(3) Na pracovištích stanovených prováděcím právním předpisem podle odstavce 2 právnická nebo fyzická osoba vlastnící nemovitost, ve které je stanovené pracoviště, nebo vlastnící pracoviště je povinna

- a) informovat dotčené osoby vykonávající práce o možném zvýšeném ozáření z přírodních zdrojů ionizujícího záření a o zdravotní újme s tím související a o překročení směrných hodnot a o provedených zásazích,

- b) zajistit měření, která dovolí pro fyzické osoby stanovené prováděcím právním předpisem určit roční efektivní dávku a v rozsahu a formou stanovenou prováděcím právním předpisem údaje o provedených měřeních evidovat a pravidelně předávat Úřadu,
- c) dovolit uvolňování přírodních radionuklidů do životního prostředí jen v míře nepřevyšující uvolňovací úroveň stanovené prováděcím právním předpisem nebo v rozsahu a za podmínek povolení Úřadu,
- d) provést zásahy ke snížení ozáření v těch případech, kdy jsou překročeny směrné hodnoty stanovené prováděcím právním předpisem a jestliže zásahem očekávané snížení zdravotní újmy je dostatečné k odůvodnění škod a nákladů spojených se zásahem,
- e) v případě, že ozáření z přírodních zdrojů ionizujícího záření může u osob vykonávajících práce překročit tři desetiny některého z limitů ozáření pro radiační pracovníky, musí tuto skutečnost oznámit Úřadu a na dotčené osoby vykonávající práce se uplatňuje stejný rozsah požadavků jako na pracovníky kategorie A, včetně preventivní zdravotní péče a osobního monitorování.

(4) Ten, kdo navrhuje umístění stavby s obytnými nebo pobytovými místnostmi nebo žádá o stavební povolení takové stavby, je povinen zajistit stanovení radonového indexu pozemku a výsledky předložit stavebnímu úřadu. Pokud se taková stavba umísťuje na pozemku s vyšším než nízkým radonovým indexem, musí být stavba preventivně chráněna proti pronikání radonu z geologického podloží. Podmínky pro provedení preventivních opatření stanoví stavební úřad v rozhodnutí o umístění stavby nebo ve stavebním povolení. Stanovení radonového indexu pozemku se nemusí provádět v tom případě, bude-li stavba umístěna v terénu tak, že všechny její obvodové konstrukce budou od podloží odděleny vzduchovou vrstvou, kterou může volně proudit vzduch. Prováděcí právní předpis stanoví postup pro stanovení radonového indexu pozemku.

(5) Ve stavbách s obytnými nebo pobytovými místnostmi, u kterých úroveň ozáření z přírodních radionuklidů ve vnitřním ovzduší je vyšší než prováděcím právním předpisem stanovené směrné hodnoty a toto ozáření lze snížit takovým zásahem, s nímž spojené očekávané snížení zdravotní újmy je dostatečné k odůvodnění škod a nákladů spojených se zásahem, je vlastník budovy povinen usilovat o jeho snížení na úroveň, jakou lze rozumně dosáhnout při uvážení hospodářských a společenských hledisek. Přesahuje-li úroveň ozáření prováděcím právním předpisem stanovené mezní hodnoty, stavební úřad nařídí provedení nezbytných úprav na stavbě z důvodů závažného ohrožení zdraví, je-li to ve veřejném zájmu. O překročení směrných nebo mezních hodnot a o provedených zásazích musí vlastník budovy informovat nájemce.

(6) Výrobci a dovozci stavebních materiálů, výrobci a dovozci balené vody a dodavatelé vody určené k veřejnému zásobování pitnou vodou jsou povinni zajistit systematické měření a hodnocení obsahu přírodních radionuklidů a v rozsahu stanoveném prováděcím právním předpisem vést o výsledcích evidenci a oznamovat tyto údaje Úřadu. Výsledky měření jsou povinni výrobci, dovozci a dodavatelé na vyžádání poskytnout veřejnosti. Stavební materiály ani balená voda, kromě vody, která je přírodním léčivým zdrojem, se nesmí uvádět do oběhu a pitná voda dodávat k veřejnému zásobování, pokud

1. obsah přírodních radionuklidů překročí mezní hodnoty stanovené prováděcím právním předpisem, nebo
2. obsah přírodních radionuklidů překročí směrné hodnoty stanovené prováděcím právním předpisem, s výjimkou případů, kdy náklady spojené se zásahem ke snížení obsahu radionuklidů by byly prokazatelně vyšší než rizika zdravotní újmy.

Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně

§ 22: odvozené limity:

pro průměrnou roční EOAR $1260 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
 pro expozici produktům přeměny radonu $2,5 \text{ MBq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$

§ 87 až § 91: pracoviště, kde může dojít k významnému zvýšení ozáření z přírodních zdrojů,

§ 93 až § 97: zásahy ke snížení ozáření z přírodních zdrojů, směrné a mezní hodnoty pro stavby, stavební materiál a dodávanou vodu.

Příloha č. 10: Směrné a mezní hodnoty pro obsah radionuklidů ve stavebních materiálech, např. mezní hodnoty hmotnostní aktivity stavebního materiálu použitého pro stavby s pobytovými prostory podle druhu stavebního materiálu jsou v rozsahu $150 \text{ až } 300 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. Směrné a mezní hodnoty objemových aktivity

radionuklidů v dodávané vodě, např. směrná resp. mezní hodnota objemové aktivity ^{222}Rn pro pitnou vodu veřejného zásobování a pro balenou stolní a pitnou vodu je 50 resp. 300 Bq.l^{-1} .

Příloha č. 11: Stanovení radonového indexu pozemku pro stavbu.

Pozemek s nízkým radonovým rizikem	Objemová aktivita radonu (kBq.m^{-3}) v půdním vzduchu pro různou plynovou propustnost základových půd		
	nízká propustnost	střední propustnost	vysoká propustnost
	<30	<20	<10

Příklady:

V pobytovém prostoru byla zjištěna průměrná roční objemová aktivita radonu $\text{OAR } 300 \text{ Bq.m}^{-3}$. Proveďte odhad efektivní dávky odpovídající pobytu 7000 hodin ročně v tomto prostoru, faktor rovnováhy F uvažujte 0,4. Použijte údaj, že 100 Bq.m^{-3} EOAR odpovídá za těchto podmínek roční efektivní dávka 4,3 mSv.

Řešení:

$$\text{EOAR} = F \cdot \text{OAR} = 0,4 \cdot 300 = 120 \text{ Bq.m}^{-3}$$

120 Bq.m^{-3} odpovídá efektivní dávce $E = 1,2 \cdot 4,3 = 5,2 \text{ mSv}$.

V ložnici s ventilací $v = 0,4 \text{ h}^{-1}$ (tj. za 1 hodinu se vymění 0,4 objemu vzduchu) bylo měřením zjištěno, že po úplném provětrání dosáhne OAR maximální hodnotu 500 Bq.m^{-3} a již se dále prakticky nemění. Zjistěte přísun OAR do této místnosti. Stanovte minimální hodnotu ventilace tak, aby nebyla překročena směrná hodnota vyhlášky č. 307/2002 Sb. pro průměrnou objemovou aktivitu radonu, která činí 400 Bq.m^{-3} .

Řešení:

$$\text{Pro ustálený stav platí } \text{OAR} = \frac{\dot{R}}{v}, \text{ z toho } \dot{R} = \text{OAR} \cdot v = 500 \cdot 0,4 = 200 \text{ Bq.m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}.$$

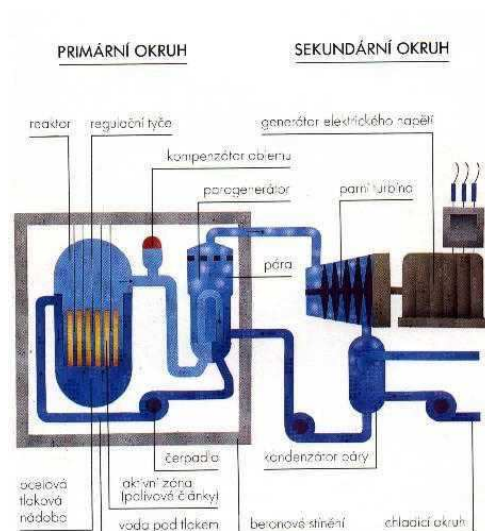
Nebude-li překročena směrná hodnota, nejsou třeba žádná opatření ke snížení OAR , z toho pro ventilaci v vyplývá

$$v \geq \frac{\dot{R}}{\text{OAR}_{\text{MAX}}} = \frac{200}{400} = 0,5 \text{ h}^{-1}.$$

6. RADIAČNÍ OCHRANA V JADERNÉ ENERGETICE

6.1 Základní typy jaderných reaktorů:

LEHKOVODNÍ REAKTORY - moderátorem i chladivem je obyčejná (lehká) voda



Tlakovodní reaktor (PWR)

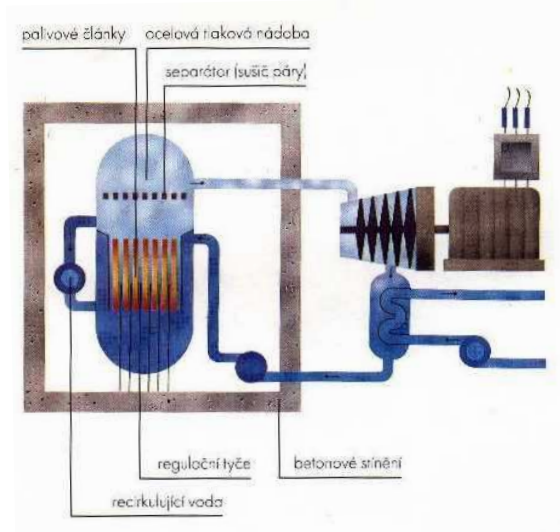
V primárním okruhu je cca 16 MPa a 320 °C.

Palivo: UO_2 , obohacení cca 2%.

Dvouokruhový systém.

Účinnost: 33%.

Zastoupení typu: 63%.



Varný reaktor (BWR)

V okruhu je cca 7 MPa a 290°C.

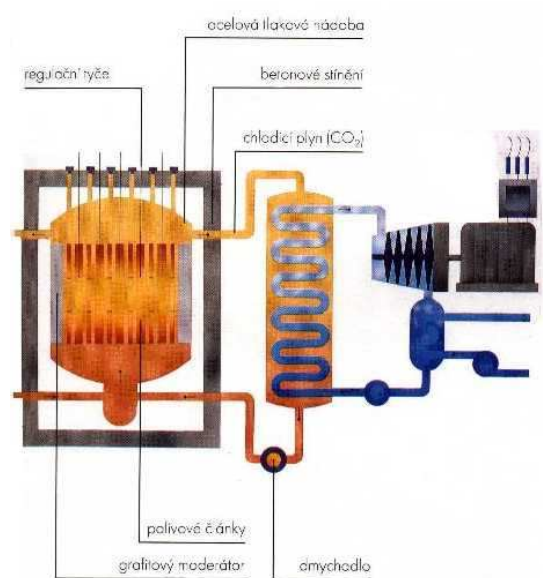
Palivo: UO_2 , obohacení 3 až 4,5%.

Jednokruhový systém.

Účinnost: 33%.

Zastoupení typu: 22%.

GRAFITOVÉ REAKTORY (moderátorem je grafit, chladičem je CO_2 , helium nebo voda)



Plynem chlazený (GCR)

Chladič: CO_2

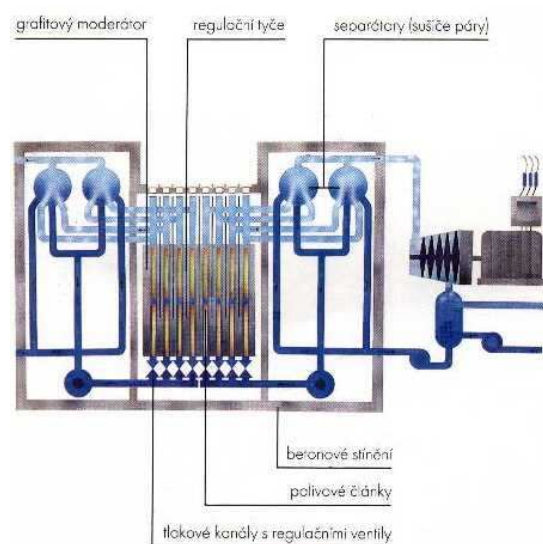
V primárním okruhu je cca 2,8 MPa a 360 °C.

Palivo: přírodní uran (0,7% U-235).

Dvouokruhový systém.

Účinnost: 26%

Zastoupení typu: 2%



Vodou chlazený (LWGR, RBMK)

Chladič: voda, varný reaktor.

V okruhu je cca 6,9 MPa a 284 °C.

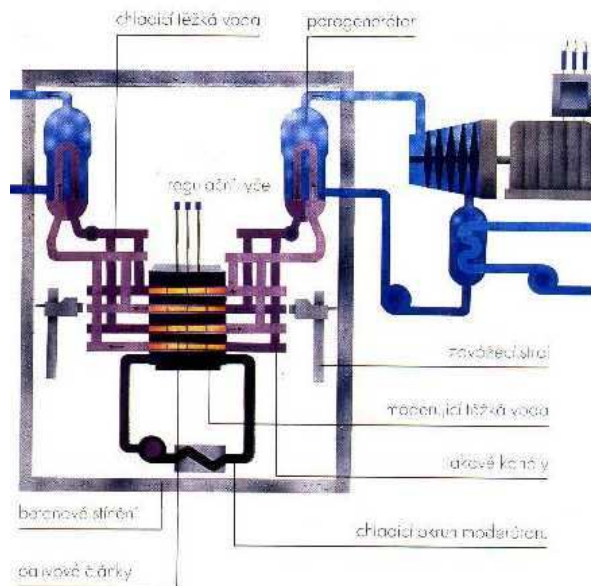
Palivo: uran, obohacení 1,8%

Jednokruhový systém.

Účinnost: 31%

Zastoupení typu: 5%

TĚŽKOVODNÍ REAKTORY (moderátorem je těžká voda, chladivem plyn (CO₂), lehká nebo těžká voda)



PHWR

Chladivo: těžká voda

V primárním okruhu je cca 9 MPa a 300 °C.

Palivo: přírodní uran (0,7% U-235).

Dvouokruhový systém.

Účinnost: 30%

Zastoupení typu: 5% (převážně Kanada, typ CANDU)

RYCHLÉ MNOŽIVÉ REAKTORY (FBR)

Nemají moderátor, štěpení rychlými neutrony. Chladivem tekutý sodík.

recirkulace uranu na Pu-239

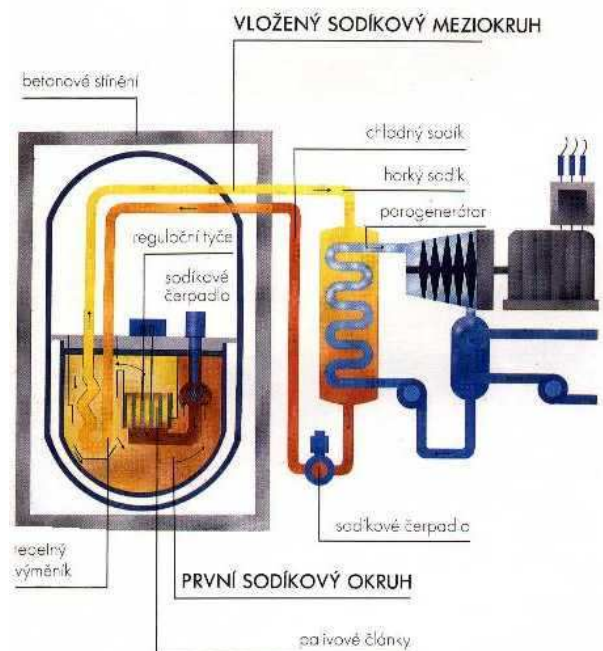
V reaktoru je 0,25 MPa a 545 °C.

Palivo: plutonium (PuO₂/UO₂)

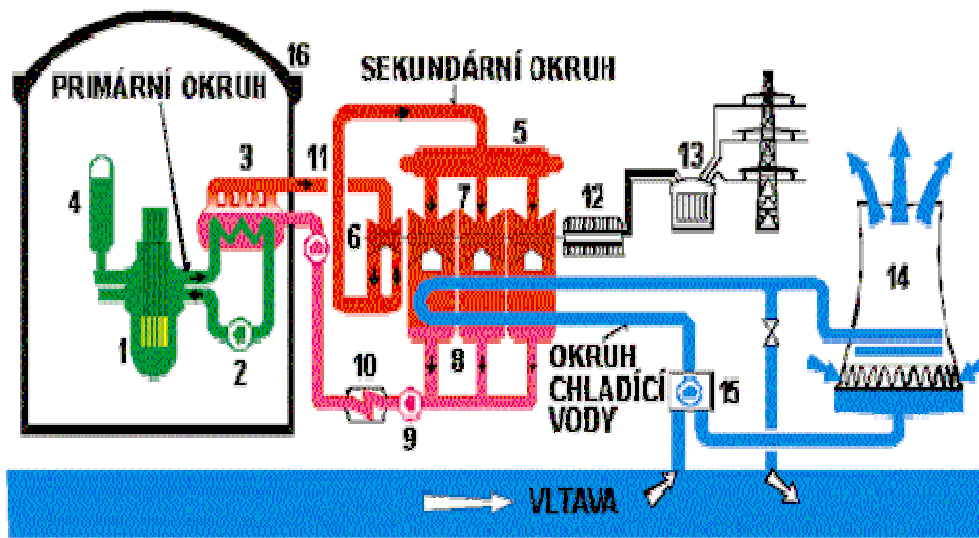
Tříokruhový systém.

Účinnost: 42%

Zastoupení typu: 1%



6.2 Schéma JE Temelín



1. **reaktor** (VVER 1000, 3000 MWt, 912 MWe, vlastní spotřeba 69 MWe, výška tlakové nádoby 10,9m, průměr 4,5 m) aktivní zóna: výška 3,6 m, průměr 3,1 m, 163 palivových kazet, 312 proutků v jedné kazetě, celkem 92 t UO₂ s obohaceným uranem (max. 5%), čtyřletý palivový cyklus, objem chladiva 337 m³, tlak 15,7 MPa, teplota vstup/výstup 290/320 °C
2. **hlavní cirkulační čerpadlo** (21 200 m³/h, 4 čerpadla na 1 blok)
3. **parogenerátor** (4 parogenerátory na 1 blok, pára na výstupu 6,3 MPa/279 °C)
4. **kompenzátor objemu**
5. **separátor**
6. **vysokotlaká část turbíny** (1 díl)
7. **nízkotlaká část turbíny** (3 díly)
8. **kondenzátor**
9. **čerpadlo kondenzátu**
10. **regenerace**
11. **napájecí čerpadlo**
12. **elektrický generátor** (alternátor 1111 MWe, 24 kV, chlazení vodou a vodíkem)
13. **transformátor**
14. **chladicí věž** (2 věže na 1 blok, výška 155 m, dolní průměr 131 m, horní průměr 83 m, průtok/odpar vody 17/0,4 m³/s)
15. **čerpací stanice**
16. **ochranná obálka - kontejnment** (výška válce 38 m, vnitřní průměr 45 m, stěna z přepjatého betonu tloušťky 1,2 m, nerezová vnitřní výstelka ocel 8 mm).

6.3 Radiační ochrana v jaderně energetickém cyklu

fáze	hlavní otázky radiační ochrany	
	pracovní prostředí	životní prostředí
těžba uranové rudy	ochrana horníků před inhalací produktů přeměny radonu a před vnějším ozářením	(vliv srovnatelný s jinou důlní činností)
zpracování rudy		eliminace vlivu radia, které je při zpracování odpadem (kalojem)

obohacovací proces a výroba paliva	značná chemická toxicita meziproduktů (zejména UF ₆)	
provoz jaderných elektráren	optimalizace ozáření pracovníků při opravách při odstávkách	organizačně technická připravenost pro ochranu obyvatel za mimořádných stavů zařízení
likvidace vyhořelého paliva, jeho přepracování a uložení odpadu		technicky i finančně náročné konečné uložení odpadu

6.4 Výpusti z jaderných elektráren do životního prostředí

Při provozu jaderné elektrárny vznikají štěpením (jader) paliva tzv. *štěpné produkty* a aktivací neutrony tzv. *aktivační produkty* (ve vlastním palivu, v pokrytí článků, v chladivu primárního okruhu a v produktech koroze materiálů). Při doplňování chladiva i netěsnostmi primárního okruhu unikají do objemu ochranné obálky zejména plynné radioaktivní látky, které jsou přes filtrační systémy vypouštěné ventilačním komínem do ovzduší. Vyměněné chladivo se speciálním čištěním zbaví všech škodlivých příměsí a radionuklidů s výjimkou tritia a vypouští se s ostatními vyčištěnými odpadními vodami do povrchových vodotečí.

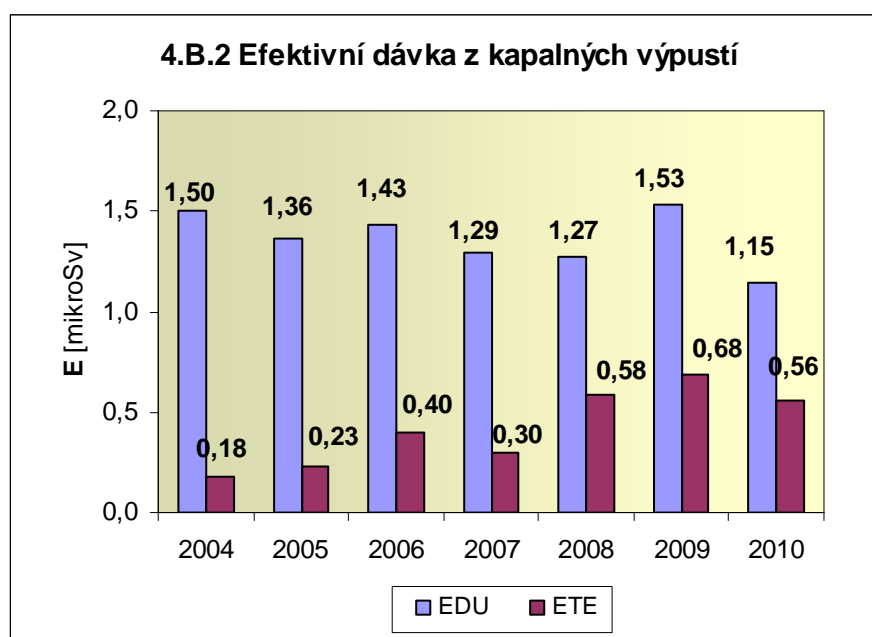
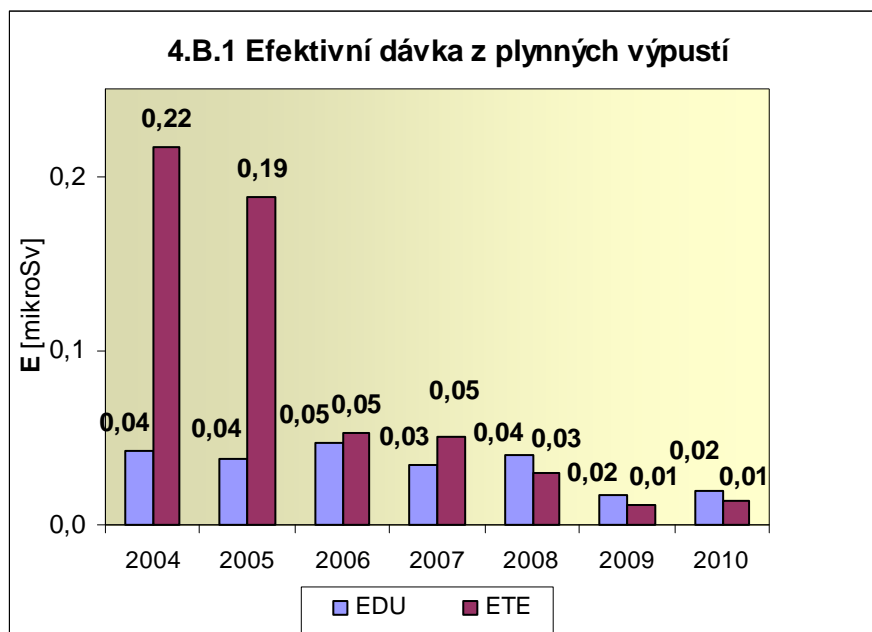
U elektráren typu PWR převažují ve výpustech do ovzduší radioizotopy xenonu a kryptonu (vznikají štěpením), ⁴¹Ar a ¹⁴C (vznikají aktivací) a tritium (vzniká štěpením i aktivací). V menší míře se vyskytují radioizotopy jódu v plynné i aerosolové formě (vznikají štěpením) a v malé míře i aerosoly vzniklé aktivací konstrukčních materiálů a jejich korozi (např. ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁶⁰Co, ⁵¹Cr).

V kapalných výpustech dominuje tritium, ostatní radionuklidy jsou zanedbatelné.

S výjimkou tritia nejsou po rozptýlení v životním prostředí již radionuklidy měřitelné. Proto se k ohodnocení vlivu výpustí na okolí (ozáření kritické skupiny obyvatel) používají výsledky z nepřetržitého měření výpustí v komíně a odpadním kanále. Použitím vhodného rozptylového modelu se pak stanovuje ozáření všemi možnými expozičními cestami. Jedná se především o vnější ozáření z oblaku a z depozitu radionuklidů vpadlých na zem (nebo vymytých srážkami) a o vnitřní ozáření v důsledku inhalace vzduchu a ingesce vody a potravin.

Vyhláška č. 307/2002 Sb. stanovuje, že efektivní roční dávka jednotlivce z kritické skupiny obyvatel nesmí být větší než 200 μSv v důsledku výpustí do ovzduší a 50 μSv v důsledku kapalných výpustí do vodoteče, tj. celkem 250 μSv (stejný požadavek je obsažen i v legislativě západoevropských zemích).

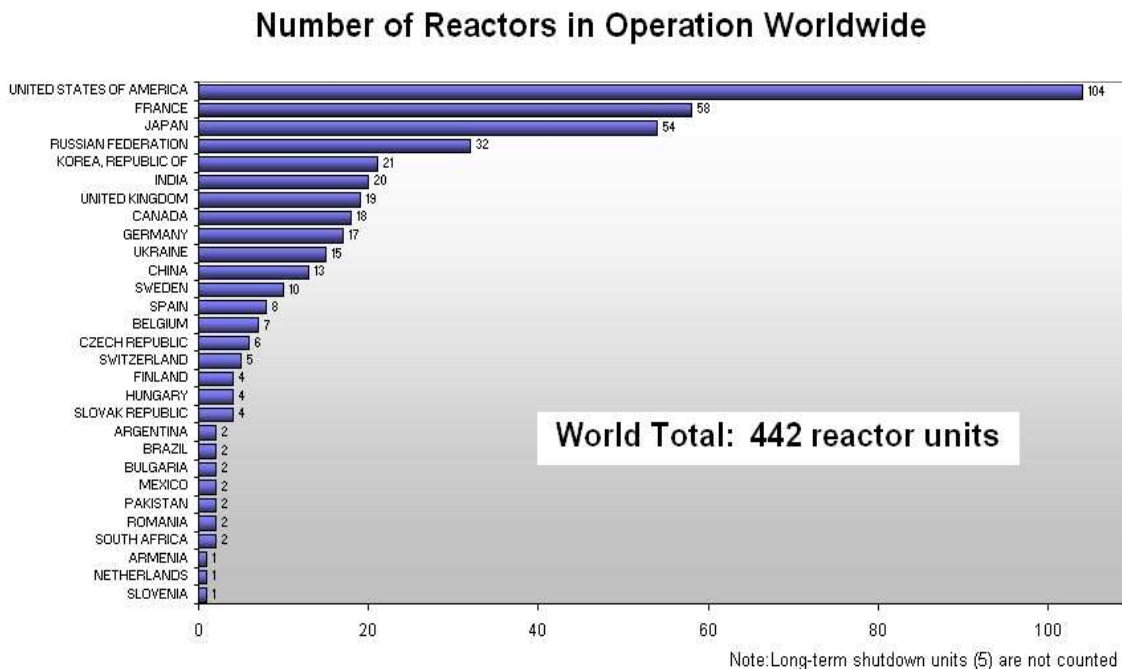
Reálná hodnota z výpustí JE Dukovany i JE Temelín je však mnohem menší - jedná se o setiny až jednotky μSv, přehled za posledních sedm roků pro obě české jaderné elektrárny a pro oba druhy výpustí je v následujících grafech.



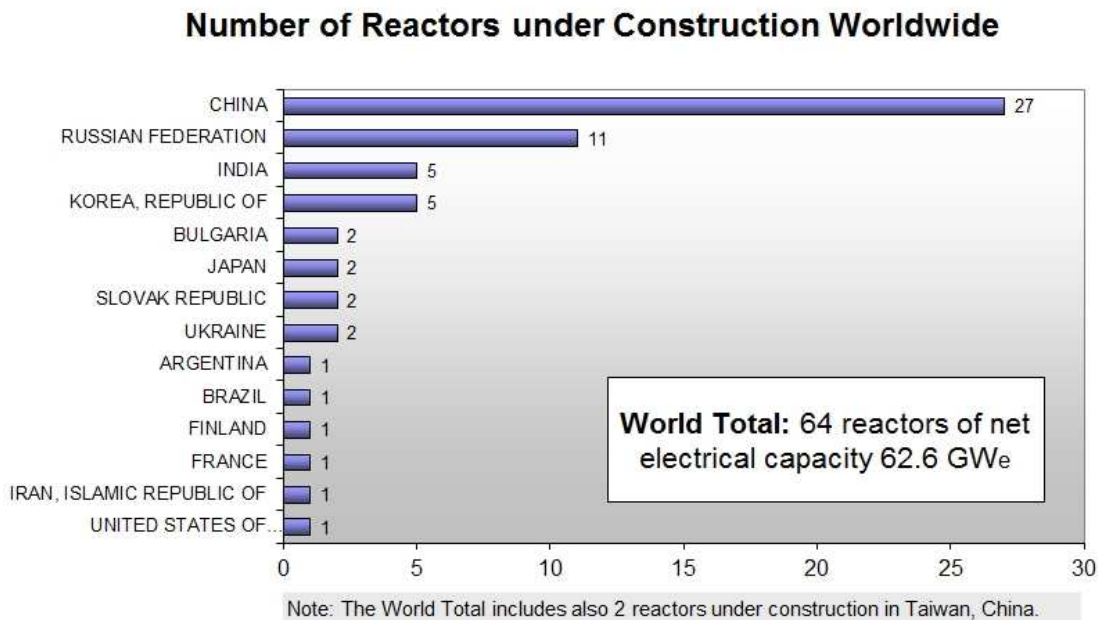
6.5 Jaderná energetika ve světě

(podle údajů Mezinárodní agentury pro atomovou energii, březen 2011)

Počet provozovaných bloků ve světě podle zemí:

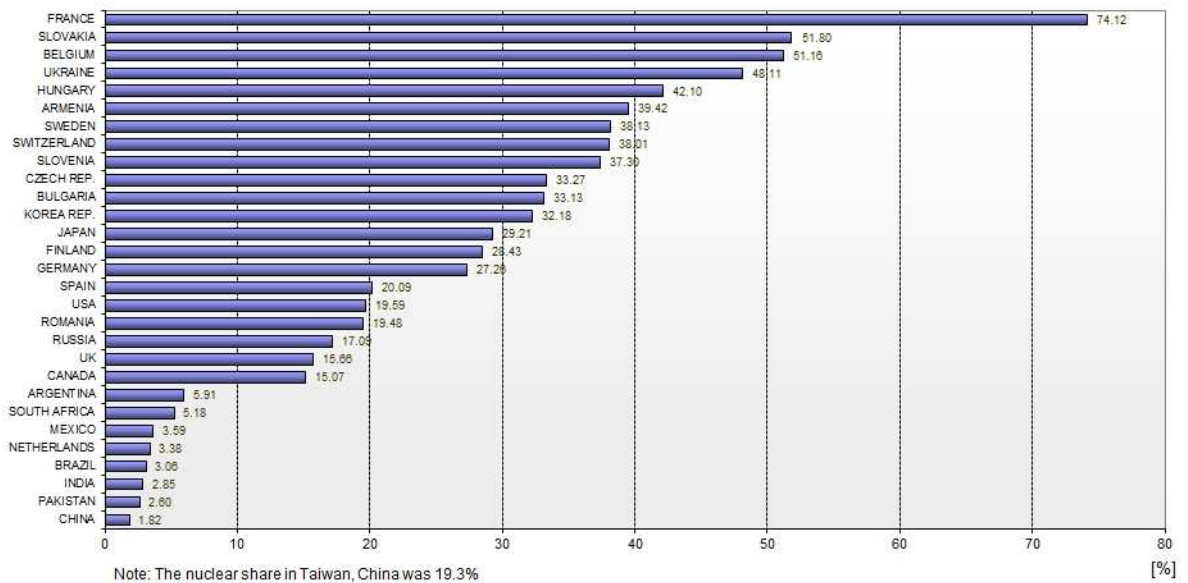


Počet bloků ve výstavbě podle zemí:



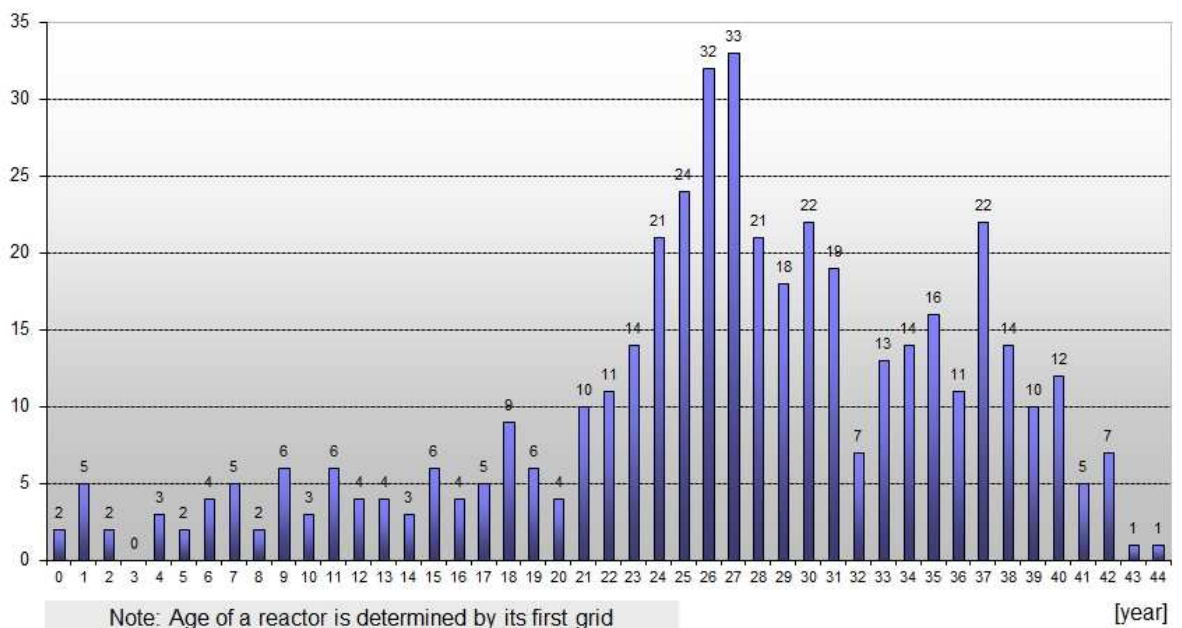
Podíl jaderných elektráren na výrobě elektrické energie podle zemí:

Nuclear Share in Electricity Generation in 2010

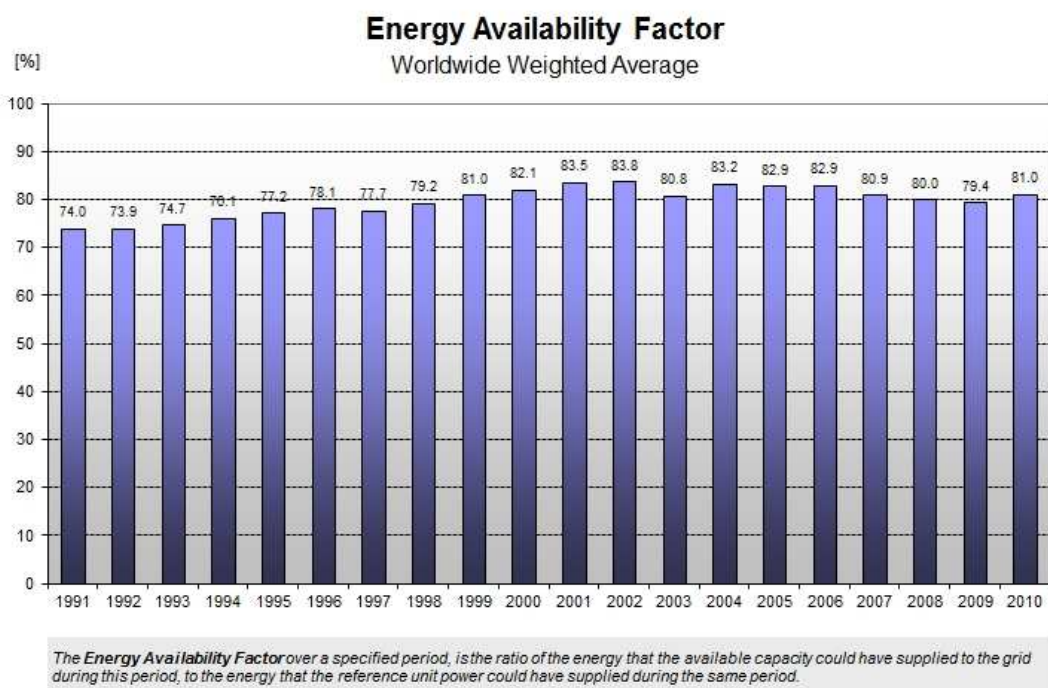


Rozdělení provozovaných reaktorů podle jejich stáří

Number of Operating Reactors by Age



Průměrný roční faktor pohotovosti



(Průměrný roční faktor pohotovosti je procentuální vyjádření poměru skutečně vyrobené elektrické energie k elektrické energii, která by byla vyrobena bez nutných odstávek v příslušném roce – uvedeno jako průměr ze všech provozovaných bloků.)

7. LEGISLATIVA RADIAČNÍ OCHRANY

Následující text je pouze výtahem některých důležitých pojmů a definic z atomového zákona a jeho prováděcích předpisů.

Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů (poslední novelizace zákonem č. 13/2002 Sb.).

Nejdůležitější prováděcí předpisy:

předpis	předmět úpravy
vyhláška č. 307/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.	radiační ochrana (nahrazuje vyhlášku č. 184/1997 Sb.)
vyhláška č. 315/2002 Sb.	zvláště důležité činnosti a odborná způsobilost (mění vyhlášku č. 146/1997 Sb.)
vyhláška č. 317/2002 Sb.	typové schvalování a přeprava (nahrazuje vyhlášky č. 142 a č. 143/1997 Sb.)
vyhláška č. 318/2002 Sb.	havarijní připravenost (nahrazuje vyhlášku č. 219/1997 Sb.)
vyhláška č. 319/2002 Sb., ve znění vyhlášky č. 27/2006 Sb.	funkce a organizace celostátní radiační monitorovací sítě
vyhláška č. 419/2002 Sb.	osobní radiační průkazy
vyhláška č. 132/2008 Sb.	o systému zajištění jakosti

Vybrané důležité definice pojmů z atomového zákona a vyhlášky č. 307/2002 Sb.

ČINNOST VEDOUCÍ K OZÁŘENÍ

1. radiační činnost:

- a) činnost s umělými zdroji ionizujícího záření, kromě činnosti v případě radiační mimořádné situace,
- b) činnost, při které jsou využívány přírodní radionuklidy

2. činnost v souvislosti s výkonem práce, která je spojena se

zvýšenou přítomností přírodních radionuklidů nebo se zvýšeným vlivem kosmického záření.

OZÁŘENÍ

1. profesní ozáření – v souvislosti s výkonem práce při radiačních činnostech
2. lékařské ozáření – v rámci lékařského vyšetření nebo léčby
3. havarijní ozáření – v důsledku radiační nehody nebo radiační havárie, netýká se zasahujících osob
4. havarijní ozáření zasahujících osob
5. přetrvávající ozáření - po radiační mimořádné situaci nebo z ukončené činnosti vedoucí k ozáření
6. potenciální ozáření - lze předem odhadnout pravděpodobnost jeho vzniku

radiační pracovník – fyzická osoba vystavená profesnímu ozáření,

radiační nehoda - událost, která má za následek nepřípustné uvolnění radioaktivních látek nebo ionizujícího záření nebo nepřípustné ozáření fyzických osob,

radiační havárie - radiační nehoda, jejíž následky vyžadují naléhavá opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí,

radiační mimořádná situace - situace, která následuje po radiační havárii nebo po takové radiační nehodě nebo po takovém zjištění zvýšené úrovně radioaktivity nebo ozáření, které vyžadují naléhavá opatření na ochranu fyzických osob,

havarijní plán - soubor plánovaných opatření k likvidaci radiační nehody nebo radiační havárie a k omezení jejich následků, který se zpracovává pro

- prostory jaderného zařízení nebo pracoviště, kde se vykonávají radiační činnosti (vnitřní havarijní plán),
- přepravu jaderných materiálů nebo zdrojů ionizujícího záření (havarijní řád),
- oblast v okolí jaderného zařízení nebo pracoviště, kde se nachází zdroj ionizujícího záření, v níž se na základě výsledků rozborů možných následků radiační havárie uplatňují požadavky z hlediska havarijního plánování, která se nazývá zóna havarijního plánování (vnější havarijní plán),

sledované pásmo - prostory, které podléhají soustavnému dohledu pro účely radiační ochrany,

kontrolované pásmo - prostory s regulovaným přístupem, ve kterých jsou zavedena zvláštní pravidla pro zajištění radiační ochrany nebo k zabránění rozšíření radioaktivní kontaminace,

optimalizace radiační ochrany - postupy k dosažení a udržení takové úrovně radiační ochrany, aby riziko ohrožení života, zdraví osob a životního prostředí bylo tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout při uvážení hospodářských a společenských hledisek,

optimalizační mez - horní mez očekávaných dávek, kterými daný zdroj může působit na fyzické osoby, a která se stanovuje pro účely přípravy optimalizace radiační ochrany,

směrná hodnota - ukazatel nebo kritérium pro posouzení úrovně radiační ochrany, které se použije v případě, kdy nejsou dostupné podrobné údaje o vykonávané činnosti vedoucí k ozáření nebo o prováděném zásahu, které by umožňovaly zhodnotit optimalizaci radiační ochrany pro jednotlivý případ,

referenční úroveň - ukazatel nebo kritérium, při jehož překročení nebo nesplnění se provádí opatření v radiační ochraně; prováděcí právní předpis stanoví podrobnosti k určování referenčních úrovní a opatření v důsledku jejich překročení,

diagnostická referenční úroveň - směrná hodnota pro ozáření v lékařské radiodiagnostice,

uvolňovací úroveň - hodnota hmotnostní aktivity nebo celková aktivita, při jejichž nepřekročení mohou být radioaktivní odpady, radioaktivní látky a předměty nebo zařízení obsahující radionuklidy nebo jimi kontaminované uváděny do životního prostředí bez povolení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost,

zprošťovací úroveň - hodnota hmotnostní aktivity nebo celkové aktivity, při jejichž nepřekročení se kontaminace radionuklidy zpravidla považuje za zanedbatelnou,

mezní hodnota - ukazatel nebo kritérium pro regulaci nepřijatelného ozáření z přírodních radionuklidů,

zásah - činnosti směřující k odvrácení nebo snížení ozáření ze zdrojů ionizujícího záření, které nejsou předmětem radiačních činností vedoucích k ozáření nebo u kterých selhala kontrola, a to působením na zdroje, cesty nebo ozařované osoby,

zdravotní újma - pravděpodobnost poškození zdraví způsobená somatickými účinky ionizujícího záření, včetně rakoviny, a vážnými genetickými poruchami, která se mohou projevit u fyzických osob po ozáření ionizujícím zářením, která se stanoví odhadem rizika snížení délky a kvality života.

Kategorie zdrojů ionizujícího záření (§ 5 až § 10)

Zdroje ionizujícího záření se podle vzestupného ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícím zářením klasifikují jako **nevýznamné, drobné, jednoduché, významné a velmi významné**, a to na základě

- a) příkonu dávkového ekvivalentu,
- b) technické úpravy a způsobu provedení,
- c) aktivity a hmotnostní aktivity radionuklidových zářičů, zpravidla ve vztahu ke zprošťovacím úrovním,
- d) možnosti úniku radionuklidů z radionuklidových zářičů,
- e) možnosti vzniku radioaktivních odpadů a náročnosti jejich zneškodnění,
- f) typického způsobu nakládání a související míry možného ozáření,
- g) potenciálního ohrožení plynoucím z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu,
- h) rizika vzniku radiační nehody nebo havárie, závažnosti následků takové události a možnosti zásahů.

Nevýznamné zdroje

- a) elektrické zařízení emitující ionizující záření, avšak neobsahující komponenty pracující s rozdílem napětí převyšujícím 5 kV,
- b) katodová trubice určená k zobrazování nebo jakékoli jiné elektrické zařízení pracující při rozdílu potenciálů nepřevyšujícím 30 kV, u něhož příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než 1 $\mu\text{Sv/h}$,

- c) radioaktivní látka, u níž součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní aktivity není větší než 1 nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní hmotnostní aktivity není větší než 1,
- d) uzavřený radionuklidový zářič, u něhož součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní aktivity nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní hmotnostní aktivity není větší než 10,
- e) zařízení obsahující uzavřený radionuklidový zářič konstruované tak, že příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než $1 \mu\text{Sv/h}$ a současně s ohledem na typický způsob nakládání s nimi, související míru možného ozáření a potenciální ohrožení plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo toto zařazení potvrzeno v rámci typového schvalování podle § 23 zákona nebo v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona pro výrobu, dovoz nebo distribuci těchto zařízení,
- f) materiál kontaminovaný radionuklidy pocházející z povoleného uvádění radionuklidů do životního prostředí podle § 9 odst. 1 písm. h) zákona, pokud Úřad v podmínkách příslušného povolení nestanovil jinak,
- g) ionizační hlásič požáru a podobný spotřební výrobek s radionuklidy, pokud v rámci vydání povolení k jejich výrobě nebo přípravě nebo k jejich dovozu či vývozu podle § 9 odst. 1 písm. s) zákona nebylo stanoveno jinak.

Drobné zdroje

- a) generátor záření, který není nevýznamným zdrojem, konstruovaný tak, že příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než $1 \mu\text{Sv/h}$ s výjimkou míst určených za běžných pracovních podmínek k manipulaci a obsluze zařízení výhradně rukama, kde může příkon dávkového ekvivalentu dosahovat až $250 \mu\text{Sv/h}$,
- b) uzavřený radionuklidový zářič, který není nevýznamným zdrojem, u něhož součet podílů aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní aktivity nebo součet podílů hmotnostních aktivit radionuklidů a příslušných zprošťovacích úrovní hmotnostní aktivity je menší než 100 v případě dlouhodobých alfa zářičů, včetně alfa-neutronových zdrojů, a menší než 1000 v ostatních případech,
- c) zařízení obsahující uzavřený radionuklidový zářič, které není nevýznamným zdrojem, konstruované tak, že příkon dávkového ekvivalentu na kterémkoli přístupném místě ve vzdálenosti 0,1 m od povrchu zařízení je menší než $1 \mu\text{Sv/h}$ s výjimkou míst určených za běžných pracovních podmínek k manipulaci a obsluze zařízení výhradně rukama, kde může příkon dávkového ekvivalentu dosahovat až $250 \mu\text{Sv/h}$, u něhož s ohledem na typický způsob nakládání s nimi, související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo toto zařazení potvrzeno v rámci typového schvalování podle § 23 zákona nebo v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona pro výrobu, dovoz nebo distribuci těchto zařízení,
- d) otevřený radionuklidový zářič, který není nevýznamným zdrojem, u něhož součet podílů aktivit nebo hmotnostních aktivit jednotlivých radionuklidů a hodnot aktivit nebo hmotnostních aktivit těchto radionuklidů uvedených v tabulce č. 1 přílohy č. 1 je menší než 10,
- e) více než 20 ionizačních hlásičů požáru nebo jiných spotřebních výrobků s radionuklidy nacházející se současně v jedné budově v držbě jedné osoby, pokud v rámci vydání povolení k jejich výrobě nebo přípravě nebo k jejich dovozu či vývozu podle § 9 odst. 1 písm. s) zákona nebylo stanoveno jinak.

Jednoduché zdroje

Jednoduchými zdroji ionizujícího záření jsou všechny zdroje ionizujícího záření, které nejsou nevýznamnými, drobnými, významnými ani velmi významnými zdroji ionizujícího záření.

Významné zdroje

- a) generátor záření určený k radioterapii nebo radiodiagnostice v humánní medicíně, kromě kostních densitometrů, kabinových rentgenových zařízení a zubních rentgenových zařízení,
- b) urychlovač částic, u něhož s ohledem na typický způsob nakládání s ním, související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo toto zařazení potvrzeno v rámci typového schvalování podle § 23 zákona nebo v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,
- c) zdroj ionizujícího záření určený k radioterapii protony, neutrony a jinými těžkými částicemi,
- d) zařízení obsahující uzavřené radionuklidové zářiče určené k radioterapii, včetně brachyterapie, kromě zařízení, u něhož s ohledem na typický způsob nakládání s ním, související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo v rámci typového schvalování podle § 23 zákona nebo v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona určeno jiné zařazení,
- e) ozařovače nebo jiná zařízení obsahující uzavřené radionuklidové zářiče, včetně ozařovačů pro ozařování potravin a jiných stacionárních průmyslových ozařovačů, u kterých s ohledem na obsah radionuklidů, na dávkový příkon a s ohledem na typický způsob nakládání s nimi, související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo toto zařazení potvrzeno v rámci typového schvalování podle § 23 zákona nebo v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,
- f) mobilní defektoskop s uzavřenými radionuklidovými zářiči.

Velmi významné zdroje - velmi významným zdrojem ionizujícího záření je jaderný reaktor.

Kategorizace pracovišť, kde se vykonávají radiační činnosti (§ 11 až § 15)

Pracoviště I. kategorie

- a) pracoviště s drobnými zdroji ionizujícího záření,
- b) pracoviště s kostním densitometrem,
- c) pracoviště s veterinárním, zubním nebo kabinovým rentgenovým zařízením,
- d) pracoviště s kompaktním mimotělovým ozařovačem krve s uzavřeným radionuklidovým zářičem,
- e) pracoviště s indikačním nebo měřicím zařízením obsahujícím uzavřený radionuklidový zářič,
- f) pracoviště s technickým rentgenovým zařízením, na němž charakter radiační činnosti nevyžaduje vymezení kontrolovaného pásma,
- g) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona.

Pracoviště II. kategorie

- a) pracoviště s jednoduchým zdrojem ionizujícího záření, které není pracovištěm I. kategorie,
- b) pracoviště s rentgenovým zařízením určeným k radiodiagnostice nebo radioterapii, kromě kostních densitometrů, kabinových a zubních rentgenových zařízení a kromě veterinárních rentgenových zařízení,
- c) pracoviště s mobilním defektoskopem s uzavřeným radionuklidovým zářičem,

- d) pracoviště s mobilním ozařovačem s uzavřeným radionuklidovým zářičem, kromě těch pracovišť, u nichž s ohledem na typický způsob provozu pracoviště, související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo jejich zařazení do jiné kategorie určeno v rámci řízení o vydání povolení k provozu pracoviště podle § 9 odst. 1 písm. d) zákona nebo povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona k nakládání s těmito ozařovači,
- e) pracoviště s indikačními nebo měřicími zařízeními obsahujícími uzavřené radionuklidové zářiče, na nichž charakter radiační činnosti vyžaduje vymezení kontrolovaného pásma,
- f) pracoviště s technickými rentgenovými zařízeními, na nichž charakter radiační činnosti vyžaduje vymezení kontrolovaných pásem,
- g) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona.

Pracoviště III. kategorie

- a) pracoviště s urychlovačem částic, kromě těch pracovišť, u nichž s ohledem na typický způsob provozu pracoviště, související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných poruch a odchylek od běžného provozu bylo jejich zařazení do jiné kategorie určeno v rámci řízení o vydání povolení k provozu pracoviště podle § 9 odst. 1 písm. d) zákona nebo povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona k nakládání s těmito ozařovači,
- b) pracoviště se zařízením obsahujícím uzavřený radionuklidový zářič určený k radioterapii, včetně brachyterapie, klasifikovaným jako významný zdroj,
- c) pracoviště se stacionárním radionuklidovým ozařovačem nebo jiným stacionárním zařízením obsahujícím uzavřené radionuklidové zářiče, který je významným zdrojem ionizujícího záření,
- d) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, pokud vybavení izolačními a ventilačními zařízeními a úroveň provedení kanalizace splňuje příslušné minimální požadavky podle tabulky č. 1 přílohy č. 4 a zařazení do této kategorie potvrdil Úřad v rámci vydání povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření podle § 9 odst. 1 písm. i) zákona,
- e) pracoviště se stacionárním průmyslovým ozařovačem určeným k ozařování potravin, předmětů běžného užívání nebo jiných materiálů,
- f) pracoviště pro těžbu a zpracování uranové rudy zahrnující těžbu, úpravu, nakládání s koncentrátem, provoz dekontaminačních stanic, shromažďování produktů hornické činnosti na odvalech a v kalových polích.

Pracoviště IV. kategorie

- a) jaderné zařízení ve smyslu § 2 písm. h) zákona,
- b) úložiště radioaktivních odpadů ve smyslu § 2 písm. u) zákona,
- c) pracoviště s otevřenými radionuklidovými zářiči, které s ohledem na vysoké aktivity zpracovávané současně na jednom pracovním místě, na typický způsob provozu pracoviště a související míru možného ozáření a potenciální riziko plynoucí z předvídatelných odchylek od běžného provozu, z nehod nebo havárií nelze zařadit do kategorie III.

Způsoby nakládání se zdroji ionizujícího záření vyžadující povolení (§ 36)

1. **výroba** zdrojů ionizujícího záření za podmínek vymezených v § 37, kromě výroby
 - generátorů záření, které jsou nevýznamnými zdroji,
 - zdrojů ionizujícího záření vyrobených pro vlastní potřebu,
 - spotřebních výrobků s přidanými radioaktivními látkami, jejichž výroba nebo dovoz byl povolen Úřadem podle § 9 odst. 1 písm. s) zákona,
2. **dovoz** zdrojů ionizujícího záření za podmínek vymezených v § 38, kromě dovozu
 - generátorů záření, které jsou nevýznamnými zdroji,
 - zdrojů ionizujícího záření dovezených pro vlastní potřebu,
 - spotřebních výrobků s přidanými radioaktivními látkami, jejichž výroba nebo dovoz byl povolen Úřadem podle § 9 odst. 1 písm. s) zákona,
3. **vývoz** zdrojů ionizujícího záření za podmínek vymezených v § 39, kromě vývozu
 - nevýznamných a drobných zdrojů,
 - spotřebních výrobků s přidanými radioaktivními látkami, jejichž výroba nebo dovoz byl povolen Úřadem podle § 9 odst. 1 písm. s) zákona,
4. **distribuce** zdrojů ionizujícího záření za podmínek vymezených v § 40, kromě distribuce
 - generátorů záření, které jsou nevýznamnými zdroji,
 - spotřebních výrobků s přidanými radioaktivními látkami, jejichž výroba nebo dovoz byl povolen Úřadem podle § 9 odst. 1 písm. s) zákona,
5. **instalace** nebo uvádění do provozu zdrojů ionizujícího záření za podmínek vymezených v § 41,
6. **skladování** radionuklidových záříčů za podmínek vymezených v § 42, kromě nezbytného skladování zdrojů ionizujícího záření při dopravě těchto zdrojů,
7. **používání** zdrojů ionizujícího záření za podmínek vymezených v § 43, kromě používání
 - nevýznamného nebo typově schváleného drobného zdroje ionizujícího záření,
 - spotřebního výrobku s přidanými radioaktivními látkami, jejichž výroba nebo dovoz byl povolen Úřadem podle § 9 odst. 1 písm. s) zákona,
 - zdroje ionizujícího záření, který je součástí zařízení, technologických celků, vybavení nebo provozních médií na pracovišti, k jehož provozu je uživatel oprávněn na základě povolení podle § 9 odst. 1 písm. d) zákona,
 - zdroje ionizujícího záření používaného pouze v rozsahu, k němuž je uživatel oprávněn na základě jiných povolení,
8. **hodnocení vlastností** zdrojů ionizujícího záření za podmínek vymezených v § 44,
9. **opravy** zdrojů ionizujícího záření za podmínek vymezených v § 45, kromě oprav
 - generátorů záření, které nevyžadují zapnutí generátoru nebo jinak nemohou být spojeny s ozářením fyzických osob provádějících opravu,
 - prováděných držitelem povolení k používání tohoto zdroje a není-li oprava spojena s vyšším potenciálním ozářením než běžný provoz,
10. **nakládání s produkty hornické činnosti** vzniklými při těžbě a zpracování uranové rudy jako hlušinový materiál uložený v odvalech a na výsypkách, které nejsou radioaktivními odpady.

Za způsob nakládání se zdroji ionizujícího záření, k němuž je třeba povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření, se nepovažují

1. nakládání se zdroji ionizujícího záření způsobem, při němž v žádném kalendářním roce nemůže kolektivní efektivní dávka být větší než 1 Sv a u žádné jednotlivé osoby efektivní dávka nemůže být větší než 10 μ Sv,
2. odběr a používání pevných stínících materiálů obsahujících pouze přírodní nebo ochuzený uran nebo přírodní thorium,
3. odběr a používání přírodních léčivých vod obsahujících pouze radionuklidy přírodního původu,
4. pracovní činnosti se zvýšeným ozářením z přírodních zdrojů, kromě činností uvedených v odstavci 1 písm. j),
5. provoz jaderného zařízení nebo úložiště radioaktivních odpadů, provozovaných na základě a za podmínek povolení podle § 9 odst. 1 písm. d) zákona,
6. těžba a zpracování radioaktivních nerostů, uskutečňovaná na základě a za podmínek povolení podle § 9 odst. 1 písm. d) zákona,
7. používání spotřebního výrobku s přidanými radioaktivními látkami, jehož výroba nebo dovoz byla povolena Úřadem podle § 9 odst. 1 písm. s) zákona.

Kategorizace radiačních pracovníků (§ 16)

Pro účely monitorování a lékařského dohledu se radiační pracovníci podle ohrožení zdraví ionizujícím zářením zařazují do **kategorie A nebo B** na základě očekávaného ozáření za běžného provozu a při předvídatelných poruchách a odchylkách od běžného provozu, s výjimkou ozáření v důsledku radiační nehody nebo havárie.

Pracovníky kategorie A jsou radiační pracovníci, kteří by mohli obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv ročně nebo ekvivalentní dávku vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny stanoveného v § 20 odst. 1 písm. a) až c); ostatní radiační pracovníci jsou pracovníky kategorie B.

Program monitorování (§ 73 až 79)

Program monitorování má podle způsobu a rozsahu nakládání se zdroji ionizujícího záření nebo s radioaktivními odpady zpravidla tyto části:

monitorování **pracoviště**,

osobní monitorování,

monitorování **výpustí**,

monitorování **okolí**.

Program monitorování musí zahrnovat monitorování pro běžný provoz, pro předvídatelné odchylky od běžného provozu i pro případy radiačních nehod a radiačních havárií

- vymezení veličin, které budou monitorovány, způsob, rozsah a frekvence měření,
- návody na vyhodnocování výsledků měření,
- hodnoty referenčních úrovní a přehled příslušných opatření při jejich překročení,
- specifikaci metod měření,
- specifikaci používaných typů měřicích přístrojů a pomůcek a jejich parametrů.

Program monitorování musí být navržen takovým způsobem a v takovém rozsahu, aby za provozu pracoviště umožňoval ověření požadavků limitování ozáření, prokazování, že radiační ochrana je optimalizována, a zajištění dalších požadavků na bezpečný provoz pracoviště, zejména včasné zjištění odchylek od běžného provozu. Monitorování se podle povahy věci navrhuje a zavádí buď jako rutinní, to je kontinuální nebo periodické, nebo jako operativní při určité činnosti s cílem zhodnotit a zajistit přijatelnost této činnosti z hlediska systému limitování. Dojde-li ke změnám v uspořádání pracoviště, ve zdrojích ionizujícího záření,

způsobu a podmínkách nakládání s nimi nebo ke změnám v monitorovacích metodách, program monitorování se aktualizuje.

Referenční úrovně

V programu monitorování se vymezují referenční úrovně, což jsou hodnoty nebo kritéria rozhodné pro určité předem stanovené postupy nebo opatření.

Referenční úrovně, při jejichž překročení je třeba údaj zaznamenávat a evidovat, se označují jako **záznamové úrovně**. Záznamové úrovně oddělují hodnoty zasluhující pozornost od hodnot bezvýznamných. Záznamové úrovně se zpravidla stanovují jako odpovídající jedné desetiné limitů a metody monitorování se volí tak, aby nejmenší detekovatelná hodnota měřené veličiny radiační ochrany byla menší než takto stanovená záznamová úroveň.

Referenční úrovně, jejichž překročení je podnětem k následnému šetření o příčinách a možných důsledcích zjištěného výkyvu sledované veličiny radiační ochrany, se označují jako **vyšetřovací úrovně**. Vyšetřovací úrovně se zpravidla stanovují jako odpovídající třem desetinám limitů ozáření nebo jako horní mez obvykle se vyskytujících hodnot.

Referenční úrovně, jejichž překročení je podnětem k zahájení nebo zavedení opatření ke změně zjištěného výkyvu sledované veličiny radiační ochrany, se označují jako **zásahové úrovně**. U zásahových úrovní vymezených v programu monitorování se uvádí také přesně o jaký zásah se jedná a jakým postupem se o něm rozhoduje. Pro jednotlivou měřenou veličinu nebo parametr může být stanoveno i několik na sebe navazujících zásahových úrovní, odpovídajících navazujícím zásahům postupně významnějším podle toho, jak roste význam zjištěného výkyvu sledované veličiny.

Základní odkazy a literatura

BASIC SAFETY STANDARDS for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources, Series No. 115, IAEA1994.

ICRP Publication 60: Recommendation ICRP, International Commission on radiological Protection, 1990,

ICRP Publication 103: Recommendation ICRP, International Commission on radiological Protection, 2007 (český překlad na webu SÚJB)

KLENER, V. Principy a praxe radiační ochrany, SÚJB Praha, 2000, ISBN 80-238-3703-6

MATZNER, J. Praktika z dozimetrie, JČU ZSF, České Budějovice, 2004, ISBN 80-7040-707-7

Vyhláška č.307/2002 Sb., o radiační ochraně, ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.

Zákon č.18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, ve znění pozdějších předpisů (viz odkaz na web SÚJB)

< <http://www.iaea.org> >

< <http://www.icrp.org> >

< <http://www.sujb.cz> >

< <http://www.suro.cz> >