

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

1. lékařská fakulta



## Kvantitativní hodnocení měření kontaminace na pracovištích nukleární medicíny

Bakalářská práce

2009

Autor: Antonín Procházka

Obor: Zdravotnická technika

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Olga Nováková, CSc.

Pracoviště: Ústav nukleární medicíny 1. LF a VFN

## **Abstrakt**

### **Cíl práce**

Porovnání hodnot měření plošné aktivity a příkonu dávkového ekvivalentu pro různě velké kontaminované plochy ve vztahu k limitním úrovním v programu monitorování Ústavu nukleární medicíny 1. LF UK a VFN. Na základě diskuse výsledků měření rozhodnout, zda je možno odvodit vztah mezi veličinami  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  a  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$  případně za jakých omezujících podmínek.

### **Metoda práce**

V práci jsou na základě experimentálních výsledků porovnány odezvy měřičů dávkového příkonu ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ) a měřiče zamoření ( $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) pro rozdílné velikosti kontaminované plochy a pro různé zdroje záření používané v nukleární medicíně.

### **Výsledky**

Z výsledků experimentální práce vyplývá nejednoznačný vztah mezi veličinami  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  a  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$  a dále velká závislost měření plošné aktivity v  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$  na typu radionuklidu a velikosti zamořené plochy.

### **Závěr, shrnutí**

Hodnoty uvedené v programu monitorování by měly být udávány pouze v jednotkách  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ , při měření plošné kontaminace v  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$  je třeba hodnoty udávat pro jednotlivé radionuklidy (rozdělení na třídy radiotoxicity je pravděpodobně nedostačující) a pro různé plochy zamoření. Neznáme-li zdroj záření kontaminace ani velikost kontaminované plochy je měření v  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$  nepřesné.

### **Klíčová slova**

Kontaminace, program monitorování, plošná aktivita, příkon dávkového ekvivalentu,  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ .

## **Abstract**

### **Title of the study**

Quantitative evaluation contamination measurements in nuclear medicine laboratories

### **Aim of the study**

To compare evaluations of contamination measurements in  $\text{Bq/cm}^2$  and  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$  for different contaminated areas and to compare the results with radiation levels which are given in the monitoring programme in Institute of Nuclear Medicine of the First Faculty of Medicine and General Teaching Hospital. On the basis of experimental results establish the relationship between the values and eventually specify conditions between them.

### **Methods of the study**

This study compares results from the measurement of dose rate meter and contamination monitor. Further evaluate the experimental results for different types of radionuclides and unlike dimensions of contaminated surfaces.

### **Results of experiment**

Results of this study are that the relation between values  $\text{Bq/cm}^2$  and  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$  are not definite. This relation is very dependant on the type of radionuclide and on the dimensions of contaminated surfaces.

### **Conclusion**

Levels which are given in the monitoring programme in Institute of Nuclear Medicine of the First Faculty of Medicine and General Teaching Hospital should be declared only in values  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ . There can be a great mistake, when the type of radionuclide and the dimensions of contaminated areas are not known and we measure in values  $\text{Bq/cm}^2$ . There should be a special levels in monitoring programme for measurements in  $\text{Bq/cm}^2$  for every type of radionuclide and for every dimension (or for some intervals of dimensions) of contaminated areas.

### **Key-words**

Contamination, monitoring programme, area activity, dose rate equivalent,  $\text{Bq/cm}^2$ ,  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ .

Prohlašuji, že jsem tuto práci pod vedením vedoucí práce RNDr. Olgy Novákové, CSc. vypracoval samostatně. Veškerou použitou literaturu jsem uvedl v seznamu literatury. Souhlasím se zapůjčováním a zveřejňováním své bakalářské práce.

V Praze dne

Antonín Procházka

.....

Děkuji RNDr. Olze Novákové, CSc., vedoucí této bakalářské práce, za výborné a odborné vedení, vhodné připomínky a hodnotné rady, dále za objasnění mnoha problémů spojených s měřením kontaminace a v neposlední řadě za ochotu a trpělivost.

# Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
1.1. Legislativní rámec .....	7
1.2. Základní hypotéza .....	7
<b>2. PROGRAM MONITOROVÁNÍ</b> .....	<b>8</b>
2.1. Text dokumentu .....	8
<b>3. POPIS PŘÍSTROJŮ</b> .....	<b>11</b>
3.1. Přístroj PTR 12 G .....	11
3.2. Přístroj Rados MicroCont verze H 13422 .....	12
3.3. FH 40 G-L .....	12
3.4. Geometrie detektoru a způsob vyhodnocení .....	13
<b>4. PŘEHLED POJMŮ A VELIČIN</b> .....	<b>16</b>
4.1. Ionizující záření, typy radioaktivních přeměn .....	16
4.2. Fyzikální jednotky .....	17
<b>5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b> .....	<b>20</b>
5.1. Příprava vzorků .....	20
5.2. Postup při měření .....	20
5.3. Výpočet deklarované aktivity $^{131}\text{I}$ a $^{57}\text{Co}$ .....	21
5.4. Obecný výpočet deklarované aktivity různě velkých filtrů ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$ ) .....	22
5.5. Výsledky měření .....	24
5.6. Zhodnocení a diskuse výsledků .....	26
5.6.1. Měření různě velkých ploch zamoření .....	26
5.6.2. Měření zamoření malých ploch .....	28
5.6.3. Aktivita v závislosti na velikosti plochy .....	31
5.6.4. Shrnutí vyhodnocených výsledků .....	32
<b>6. ZÁVĚR</b> .....	<b>35</b>
<b>7. SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>36</b>
<b>8. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ</b> .....	<b>37</b>
<b>9. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK</b> .....	<b>38</b>
<b>10. PŘÍLOHY</b> .....	<b>39</b>
A) Příloha číslo 1 .....	39
B) Příloha číslo 2 .....	40

# 1. Úvod

## 1.1. Legislativní rámec

V České republice upravuje nakládání s radioaktivními látkami na medicínských pracovištích zákon č. 18/1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření a související vyhlášky a předpisy. Tento zákon, který bývá běžně nazýván atomový zákon, určuje jednak postupy při práci s otevřenými i uzavřenými zřídly, ale také program radiační ochrany, který dále upravuje vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) č. 307/2002 sb., o radiační ochraně. Na každém pracovišti nukleární medicíny musí být dle vyhlášky vypracován tzv. program monitorování, který přesně určuje zásady monitorování osob, prostředí a kontaminovaných předmětů. Dále je na každém pracovišti dohlížející osoba, která zodpovídá za radiační ochranu a vede příslušnou dokumentaci. Tato bakalářská práce vychází z Programu monitorování Ústavu nukleární medicíny Všeobecné fakultní nemocnice a 1. lékařské fakulty v Praze (dále jen program monitorování).

## 1.2. Základní hypotéza

Výše uvedený program monitorování stanovuje pro kontrolu kontaminace referenční úroveň dvou fyzikálních veličin. První veličina je příkon dávkového ekvivalentu vyhodnocovaný v jednotkách  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ , druhá je plošná aktivita v jednotkách  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Dosud nebyl stanoven vztah mezi těmito veličinami. Cílem práce je najít tento vztah na základě experimentů s různými zdroji záření a určit omezující podmínky. Především do jaké míry ovlivňují výsledky měření různými přístroji vlastnosti radionuklidu a velikost kontaminovaného místa. Vlastnostem radionuklidů – jako jsou energie či rozpadová konstanta – se věnuji v kapitole číslo 4. Závislost velikosti zamořeného místa a měřené veličiny v  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$  je velmi důležitá, jelikož často při měření kontaminace nevíme, jak velká je zamořená plocha.

## 2. Program monitorování <sup>[1]</sup>

Tento dokument určuje postupy pro zabezpečení ochrany pracovníků a pacientů. Stanovuje limity pro osobní dozimetrii, pro kontaminaci prostředí a pracovních povrchů. Dále se také zabývá přeměšováním radioaktivních odpadů. Program monitorování vychází z vyhlášky SÚJB č. 307/2002 sb., o radiační ochraně. Originální tabulka uvolňovacích úrovní je umístěna v příloze č.1 (strana 39).

### 2.1. Text dokumentu

Všichni pracovníci kategorie A (lékaři, VŠ nelékaři, SZP a ostatní vybraní pracovníci) musí být vybaveni osobními dozimetry. Hodnoty dozimetrů jsou odečítány každý měsíc. Jedná se o osobní dozimetry nošené na přední levé straně hrudníku a o termoluminiscenční dozimetry prstové, kterými jsou vybaveni vybraní pracovníci.

Jsou stanoveny tři referenční úrovně: záznamová, vyšetřovací a zásahová. Překročení záznamové úrovně je nutno uvést v záznamech o monitorování. Při překročení vyšetřovací úrovně je zapotřebí zjistit a zaznamenat příčinu překročení a přijmout opatření k jejímu odstranění. Je-li překročena zásahová úroveň, musí být sepsán protokol a přijata opatření zamezující dalšímu ozáření. Dohlížející osoba odešle protokol včetně návrhu přijatých opatření do Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB).

Měsíční referenční úroveň	Osobní dávkový ekvivalent (mSv)	
	Osobní dozimetry	Prstové dozimetry
Záznamová úroveň	0,1	0,1
Vyšetřovací úroveň	0,7	15
Zásahová úroveň	20,0	150

Tab.2.1.: Měsíční referenční úrovně pro osobní dozimetrii pracovníků.

Povrchová kontaminace pracovníků může být měřena dvěma veličinami, příkonem dávkového ekvivalentu a plošnou aktivitou. Jejich referenční meze se různí podle typu



radionuklidu, respektive podle jejich radiotoxicity. Rozeznáváme čtyři třídy radiotoxicity. Třída 1 obsahuje z používaných radionuklidů na ÚNM  $^{223}\text{Ra}$ . Do třídy 2 patří  $^{18}\text{F}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ . Používané radionuklidy třídy radiotoxicity 3 jsou:  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{186}\text{Re}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{188}\text{W}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ . Originální tabulka rozdělení radionuklidů podle radiotoxicity z vyhlášky SÚJB č. 307/2002 sb., o radiační ochraně je umístěna v příloze práce na straně 40 (příloha č. 2).

Referenční úroveň	Plošná aktivita ( $\text{Bq}/\text{cm}^2$ )	
	Třída radiotoxicity 1 a 2	Třída radiotoxicity 3
Záznamová úroveň	0,3	3
Vyšetřovací úroveň	1,5	15
Zásahová úroveň	3	30

Tab.2.2.: Referenční úrovně plošné aktivity při kontrole kontaminace osob a pracovních oděvů.

Referenční úroveň	Příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )
Záznamová úroveň	0,7
Vyšetřovací úroveň	5
Zásahová úroveň	100

Tab.2.3.: Referenční úrovně příkonu dávkového ekvivalentu při kontrole kontaminace osob a pracovních oděvů.

Při monitorování kontaminace prostředí stanovuje program monitorování tři možné způsoby: měření příkonu dávkového ekvivalentu, měření plošné kontaminace a monitorování pomocí stěrů měřených ve scintilačním spektrometru. Pracoviště jsou monitorovány průběžně podle charakteru práce a vždy na konci pracovní doby. Pro kontrolované a sledované pásmo platí specifický režim.

Referenční úroveň	Příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv/h}$ )		
	Sledované pásmo	Kontrolované pásmo	
		Vnitřní část laminárních boxů	Ostatní prostory
Záznamová úroveň	0,4	5	0,7
Vyšetřovací úroveň	5	50	10
Zásahová úroveň	100	500	200

Tab.2.4.: Referenční úrovně příkonu dávkového ekvivalentu pro kontrolované a sledované pásmo.

Referenční úroveň	Plošná aktivita ( $\text{Bq/cm}^2$ ) v kontrolovaném pásmu	
	Třída radiotoxicity 1 a 2	Třída radiotoxicity 3
Záznamová úroveň	3	30
Vyšetřovací úroveň	15	150
Zásahová úroveň	30	300

Tab.2.5.: Referenční úrovně plošné aktivity pro kontaminaci povrchů v kontrolovaném pásmu.

### 3. Popis přístrojů

Pro měření jsem měl k dispozici tři přístroje. Dva přístroje pro měření příkonu dávkového ekvivalentu – *PTR 12 G*, a *FH 40 G-L* – a přístroj *MicroCont* pro měření plošné kontaminace.



Obr.3.1. Přístroje použité k měření

#### 3.1. Přístroj PTR 12 G <sup>[2]</sup>

Detektorem přístroje je Geiger-Müllerova trubice typu SBM 20, která má tvar válce o délce 10 cm a průměru 10 mm. Přístroj je schopen detekovat záření gama o energii vyšší než 30 keV a záření beta od energie 450 keV. Životnost detektoru o průměru 10mm a délce 100 mm je  $10^9$  impulsů. Přístroj je vybaven LCD displejem. Zobrazovaná hodnota při nízkých četnostech impulsů je průměr posledních deseti naměřených hodnot, interval měření je jedna

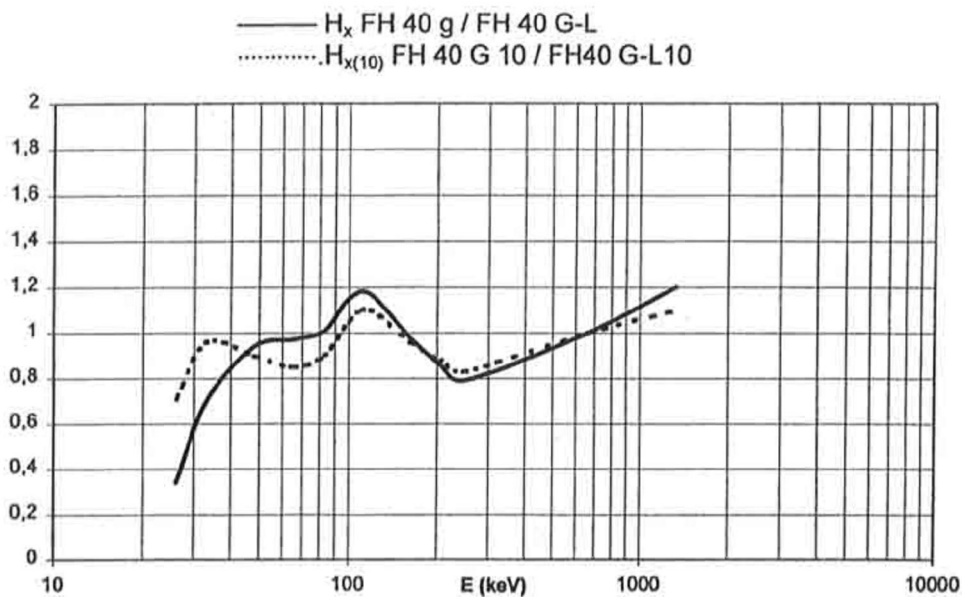
vteřina. Napájení přístroje zajišťují dva tužkové monočlánky velikosti AAA. Doba provozu přístroje *PTR 12 G* je okolo 150 hodin. Optimální provozní teplota je 10 až 40°C, relativní vlhkost při měření by neměla být vyšší než 75%. Rozměry přístroje jsou 118 x 74 x 32 mm, hmotnost 165 g. Přístroj je také vybaven svítivou diodou a zvukovým indikátorem, které usnadňují určení kontaminovaných míst.

### 3.2. Přístroj Rados MicroCont verze H 13422 <sup>[3]</sup>

Přístroj *MicroCont* lze používat se dvěma druhy detektorů: s xenonovým velkoplošným detektorem a plynovým průtokovým detektorem. Detektory lze vyměnit podle potřeby. Při měření jsem použil xenonový proporcionální detektor, který je určen přímo pro použití v nukleární medicíně. Je totiž popisován jako optimální pro měření kontaminace zdroji záření o nízkých energiích, což jsou například <sup>99m</sup>Tc, <sup>125</sup>I nebo <sup>131</sup>I. Jako pracovní plyn je použit 15% metan. Plocha okna detektoru je 226 x 112 mm. Pracovní napětí dosahuje 1950 V. Provozní teplotní rozsah je -30 až +50°C, při maximální relativní vlhkosti 98%. Přístroj umožňuje volbu mezi čtyřmi provozními režimy: impulsy za sekundu, Bq, Bq/cm<sup>2</sup>, impulsy za sekundu s automatickým odečítáním pozadí. Při měření aktivity (Bq, Bq/cm<sup>2</sup>) lze na přístroji nastavit typ měřeného radionuklidu. V paměti *MicroContu* jsou uloženy kalibrační faktory pro čtrnáct radionuklidů, pro které přístroj počítá aktivitu měřeného zdroje záření.

### 3.3. FH 40 G-L <sup>[4]</sup>

Tento měřič příkonu dávkového ekvivalentu je vybaven proporcionálním detektorem ve tvaru válce o průměru 25,8 mm a výšce 25 mm, který je umístěn ve zúžené části přístroje a jeho střed je označen. Přístroj měří v rozpětí od 10 nSv/h do 100 mSv/h. Rozměry přístroje jsou 195 x 73 x 42 mm. Velkou část přístroje tvoří podsvícený LCD display, který zobrazuje informace o stavu přístroje (stav baterií, hlášení chyb) a naměřené číselné hodnoty spolu s grafickým ukazatelem. Přístroj měří zářiče gama o energii v rozmezí 36 keV – 1,3 MeV a je kalibrován etalonem <sup>137</sup>Cs o energii 662 keV. Energetická závislost detektoru je uvedena v grafu 3.1.



Graf 3.1.: Energetická závislost přístroje *FH 40 G-L*. Závislost odezvy měření (relativní jednotky) na energii měřeného radionuklidu. Platí plná křivka.

### 3.4. Geometrie detektoru a způsob vyhodnocení

Všechny přístroje pro měření kontaminace pracují na principu počítání impulsů, které odpovídají emitovaným částicím při radioaktivní přeměně. Poměr přeměn a detekovaných impulsů je závislý na celkové detekční účinnosti detektoru.

**Celková detekční účinnost** je poměr počtu zaznamenaných impulsů detektorem a počtu kvant gama nebo částic emitovaných zdrojem záření za časovou jednotku. *Detekční účinnost* je počet impulsů zaznamenaných detektorem k počtu kvant gama nebo částic emitovaných zdrojem záření a dopadajících do citlivého pole detektoru. Oba parametry se liší **geometrickým faktorem**, který vyjadřuje vzájemné prostorové uspořádání detektoru a zdroje záření. <sup>[5]</sup>

Celková detekční účinnost je závislá na typu radionuklidu, neboť neplatí vždy, že jedna přeměna odpovídá jedné emitované částici nebo gama kvantu. Různé energie jsou také v jednotlivých detektorech absorbovány rozdílně. <sup>[6]</sup>

Detektory přístrojů použitých v této práci se rozměrově liší. Pomocí měření různě velkých zamořených ploch zde zkoumám vliv velikosti plochy na odezvu detektoru.

Další částí, kde se jednotlivé přístroje liší, je elektronická sestava s mikropočítačem, který slouží k přepočtu četností impulsů na fyzikální veličiny (v našem případě buď na příkon

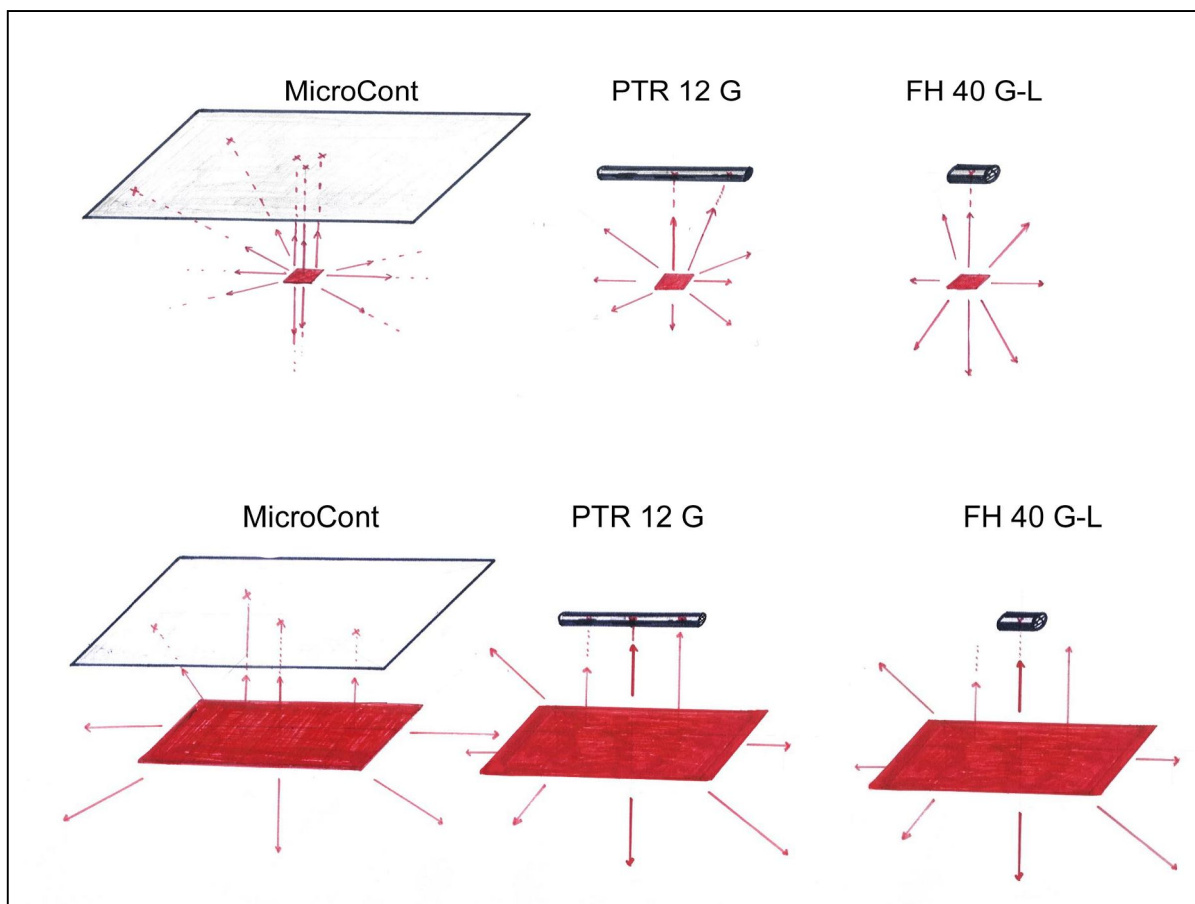
dávkového ekvivalentu v  $\mu\text{Sv/h}$  nebo na plošnou aktivitu v  $\text{Bq/cm}^2$ ). Tento přepočet je realizován pomocí konstanty, která je u každého výrobce různá a hraje zásadní úlohu v přesnosti měření.

Velmi důležitým parametrem, který souvisí s výše zmíněným je **energetická závislost detektoru**. Každý detektor je kalibrován pro určitou energii (pro určitý radionuklid) a pro ostatní energie je měření nepřesné. Některé přístroje mají možnost přepínání mezi jednotlivými předdefinovanými radionuklidy, které měříme, a snaží se tuto nepřesnost korigovat. To je případ přístroje *MicroCont*, u přístrojů *PTR 12 G* a *FH 40 G-L* se používají v okolí detektoru mechanické filtry, které energetickou závislost do jisté míry kompenzují a přístroje měří v  $\mu\text{Sv/h}$  „nezávisle“ na typu radionuklidu.

Rozměry detektorů v jednotlivých přístrojích se značně liší. Správnost měření je závislá na přesném umístění detektoru nad kontaminovanou plochu. Pokud měříme zamoření, měli bychom podle programu monitorování postupovat tím způsobem, že nejprve najdeme místo s nejvyšší odezvou přístroje a poté nad tímto místem provedeme měření. Uvážíme-li, že například s přístrojem *FH 40 G-L* čekáme na výslednou hodnotu zhruba minutu a většinou nevíme, jak je zamořená plocha velká, je tento postup časově náročný. Proto je velikost detektoru použitého přístroje důležitým faktorem.



Obr.3.2. Velikosti detektorů v jednotlivých přístrojích (označeno červeně)



Obr.3.3. Geometrie měření v závislosti na rozměrech detektoru a velikosti zamořené plochy. Červeně jsou znázorněny radionuklidy (nahore o velikosti 4 cm<sup>2</sup>, dole o velikosti 165 cm<sup>2</sup>), černě jsou zakresleny detektory. Schéma je zmenšeno, poměry jsou zachovány.

## 4. Přehled pojmů a veličin

Tato kapitola shrnuje tematiku jaderné fyziky z hlediska jejího využití k radiační ochraně v nukleární medicíně. Zohledňuje především vztahy mezi jednotlivými veličinami, se kterými se dále pracuje v protokolu měření. Sleduji pouze tu část tohoto rozsáhlého tématu, která je nezbytná pro objasnění mého experimentu.

### 4.1. Ionizující záření, typy radioaktivních přeměn

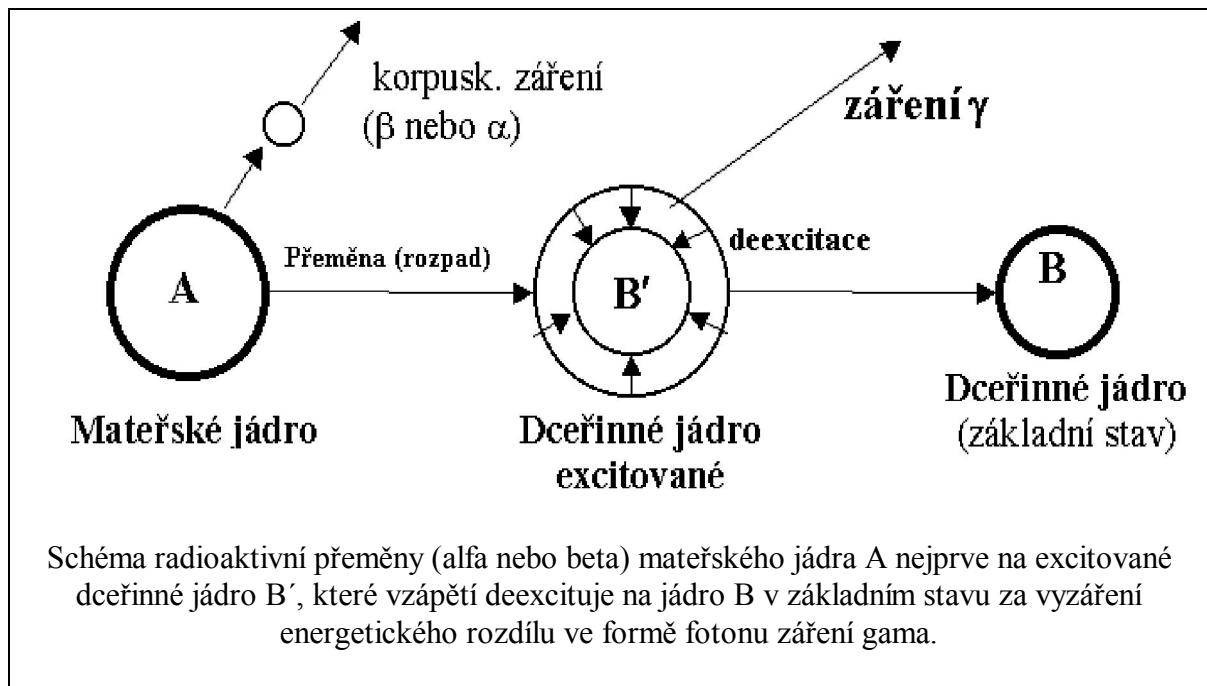
**Radioaktivita** je fyzikální jev, při kterém dochází k samovolné přeměně atomových jader určitého prvku na jádra jiného prvku. Tento jev je doprovázen emisí ionizujícího záření, které je schopno ionizovat nebo excitovat atom. [7]

Mezi ionizující záření řadíme: záření alfa, beta, gama, X-záření, popř. neutronové záření. V nukleární medicíně se nejčastěji používá záření gama a beta (elektrony, pozitrony), popřípadě X-záření, které je emitováno z elektronového obalu jádra při deexcitaci z vyšší energetické hladiny na hladinu nižší, vzniká při interakci vysokoenergetického záření s hmotou. Záření alfa a beta se nazývá korpuskulární, jelikož jde o částice. Záření gama je elektromagnetické záření, má tedy duální charakter, energie tohoto záření je nesena jednotlivými kvanty gama, tedy fotony. Toto záření má velkou pronikavost, proto je ideální pro scintigrafii. Naproti tomu záření beta rychle interaguje s látkou a jeho dolet je v lidském těle do 10 mm. [5]

K radioaktivní přeměně beta dochází při přebytku neutronů v jádře (emitují se  $e^-$  a částice antineutrino) nebo nedostatku neutronů v jádře (emituje se  $e^+$  a neutrino). Následkem této přeměny vzniká dceřinné jádro, které je většinou v excitovaném stavu. Následně, zpravidla ihned po radioaktivní přeměně, dochází k deexcitaci dceřinného jádra za současného vyzáření gama záření. [7]

Z tohoto důvodu je většina zářičů beta – a také alfa – zároveň zářiči gama. Čisté alfa nebo beta zářiče (např.  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ) jsou vzácné. Čisté zářiče gama jsou pouze uměle vyráběné radionuklidy, kde je při výrobě docíleno, že setrvávají déle v metastabilním, excitovaném, stavu a emitují pouze záření gama. Čistý gama zářič je  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , které je základním radionuklidem pro nukleární medicínu, a také základním zdrojem záření pro experimenty této práce. [7]





Obr.4.1. Převzato z Ullmann, V.: astronuklfyzika.cz [7]

## 4.2. Fyzikální jednotky

Základní charakteristikou každého radionuklidu je **energie**. Alfa a gama záření je monoenergetické, naproti tomu energie jednotlivých elektronů vyzářených při přeměně beta jsou prakticky od nuly až do určité maximální hodnoty. Energie elektronů přeměny beta se v tabulkách udává okolo jedné třetiny energie maximální.<sup>[5]</sup>

Rychlost rozpadu radionuklidu je charakterizována **rozpadovou konstantou  $\lambda$** , její rozměr je  $s^{-1}$  a je pro každý radionuklid specifická. V praxi používanou veličinou je **poločas přeměny ( $t_{1/2}$ )**, což je doba, za kterou se přemění právě polovina jader daného radionuklidu.<sup>[8]</sup>

Tímto se dostáváme k veličině zvané **aktivita** radionuklidu, která charakterizuje množství radioaktivní látky. Je definována jako podíl středního počtu samovolných radioaktivních přeměn z daného energetického stavu v určitém množství radionuklidu za krátkou dobu  $dt$  a této doby.<sup>[5]</sup>

Jednotkou je Becquerel (Bq), zdroj záření má aktivitu 1 Bq, přemění-li se v něm za jednu sekundu jedno radioaktivní jádro.<sup>[9]</sup>

Na pracovištích nukleární medicíny se pracuje s aktivitami řádově v desítkách a stovkách MBq. Změnu aktivity můžeme zapsat dvěma vztahy:

1) pomocí rozpadové konstanty<sup>[5]</sup>

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

2) pomocí poločasu přeměny<sup>[5]</sup>

$$A_t = A_0 \cdot (1/2)^n \quad (\text{rovnice dále značena jako vztah A}).$$

Kde: <sup>[5]</sup>

$A_0$  je aktivita radionuklidu v čase  $t = 0$ ,

$A_t$  je aktivita radionuklidu v čase  $t = t$ ,

$\lambda$  je přeměnová konstanta ,

$e$  je základ přirozeného logaritmu (přibližně 2,7183),

$n$  je rovno  $t / t_{1/2}$ ,

$t_{1/2}$  je poločas přeměny.

Další veličinou, vztahující se k interakci s látkou (tedy i pacientem nebo pracovníkem), je **absorbovaná dávka D**. Ta je charakterizována jako poměr střední energie ionizujícího záření předané objemovému elementu látky a hmotnosti látky v tomto objemovém elementu. Její jednotkou je 1 gray (Gy), rozměr je J/ kg. <sup>[8]</sup>

Ionizace ozářené látky je závislá jak na vlastnostech záření a době ozáření, tak na vlastnostech této látky. Proto je zavedeno několik odvozených veličin, ve kterých se stanovuje dle atomového zákona možná expozice. Jsou to především:

1) Dávkový ekvivalent

$$H = D \cdot Q \quad \text{jednotka Sv (J/kg)} \quad [5]$$

2) Ekvivalentní dávka (pro orgány)

$$H_T = D_T \cdot w_T \quad \text{jednotka Sv (J/kg)} \quad [5]$$

### 3) Efektivní dávka (pro celé tělo)

$$E = \sum H_T \cdot w_T \quad \text{jednotka Sv (J/kg),}^{[5]}$$

kde platí: <sup>[5]</sup>

Q je jakostní činitel. Určuje, kolikrát je určitý druh záření biologicky účinnější než záření gama (pro  $\beta$  a  $\gamma$  a X záření je  $Q = 1$ , pro neutrony je Q zhruba v rozmezí 2 – 10, pro alfa  $Q \approx 20$ ). Faktor Q pro jednotlivá záření je přesně stanoven ve vyhlášce SÚJB č. 307/2002 sb., o radiační ochraně,

$D_T$  je střední absorbovaná dávka v orgánu či tkáni,

$H_T$  je ekvivalentní dávka v dané tkáni,

$w_T$  je tkáňový váhový faktor, který vyjadřuje rozdílnou radiosenzitivitu orgánů a tkání z hlediska pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků (pro nejcitlivější tkáně je roven 0,2, pro nejméně citlivé je 0,05, součet všech  $w_i$  je roven 1), <sup>[10]</sup>

$w_r$  je radiační váhový faktor (pro fotony a elektrony 1, pro protony 5, pro neutrony 5 – 20, pro částice alfa 20).<sup>[11]</sup>

## 5. Experimentální část

### 5.1. Příprava vzorků

Cílem práce je zjistit, jak se jednotlivé veličiny chovají v závislosti na velikosti zamořené plochy a typu radionuklidu. K dispozici jsem měl čtyři druhy radionuklidů:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{57}\text{Co}$  a  $^{111}\text{In}$  (všechny potřebné informace o těchto isotopech jsem získal z fyzikální tabulky Berkeley University umístěné na internetu – více pod číslem 12 v seznamu literatury – a dále z literárního pramenu CHERRY Simon R., SORENSON James A., PHELPS Michael E. *Physics in Nuclear Medicine*, který je uveden v seznamu literatury pod číslem 6). Pro  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  a  $^{111}\text{In}$  jsem porovnával velikosti zamořené plochy. Připravil jsem čtyři různě velké plochy filtračního papíru o velikosti 2x2, 5x5, 10x10 a 11x15 cm. Pro  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  jsem nastříhal dvě sady po čtyřech filtračních papírech, pro  $^{111}\text{In}$  jednu. Filtrační papíry jsem poté nechal v laboratoři namočit v roztoku  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  a  $^{111}\text{In}$ .  $^{131}\text{I}$  a  $^{57}\text{Co}$  jsem měřil pouze nad vzorkem malé velikosti. U kobaltu se jednalo o bodový zářič (velikost přibližně  $0,5\text{ cm}^2$ ), v případě jodu měl vzorek velikost zhruba  $4\text{ cm}^2$ .

### 5.2. Postup při měření

Postup při měření kontaminace podle programu monitorování je nejprve najít místo s nejvyšší odezvou a poté zde měřit. Volil jsem obdobný postup a umisťoval jsem přístroj nad střed vzorku, kde je odezva nejvyšší. Při měření zamoření se nesmíme přístrojem dotknout kontaminované plochy (mohli bychom zamořit přístroj), ale na druhou stranu musíme měřit co nejbližší nad kontaminovaným místem (počet detekovaných impulsů klesá se čtvercem vzdálenosti od zdroje), proto jsem přístroj umisťoval na podložku do výšky přibližně jeden centimetr.

Není-li uvedeno jinak, měřil jsem vždy pět hodnot, ze kterých jsem počítal aritmetický průměr. Pro měření pozadí jsem zaznamenával deset hodnot. Jednotlivé hodnoty jsem měřil a zapisoval po deseti vteřinách.

Deklarovanou aktivitu jsem určoval buď výpočtem z certifikátů použitých etalonů ( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) nebo měřením vzorku základního roztoku v měřiči aktivit Bq 3. Více o způsobu určení deklarované aktivity je uvedeno v následujících kapitolách 5.3. a 5.4.

### 5.3. Výpočet deklarované aktivity $^{131}\text{I}$ a $^{57}\text{Co}$

Deklarovanou aktivitu vzorků  $^{131}\text{I}$  a  $^{57}\text{Co}$  jsem vypočítal z příslušných certifikátů podle vztahu: <sup>[5]</sup>

$$A_t = A_0 \cdot (1/2)^n \quad (\text{vztah A}).$$

Kde: <sup>[5]</sup>

$A_t$  je aktivita radionuklidu v čase mého měření,

$A_0$  je aktivita radionuklidu v čase  $t = 0$ , kterou známe,

$n$  je rovno  $t / t_{1/2}$ ,

$t$  je čas mezi  $t=0$  a dobou měření,

$t_{1/2}$  je poločas přeměny.

#### Výsledek $^{131}\text{I}$

Hodnoty:  $A_0 = 5,55 \text{ MBq}$ ,  $t = 10 \text{ dní}$ ,  $t_{1/2} = 8,0207 \text{ dní}$

Výsledek:  $A_t = 2,33 \text{ MBq}$

#### Výsledek $^{57}\text{Co}$

Hodnoty :  $A_0 = 225,6 \text{ kBq}$ ,  $t = 1301 \text{ dní}$ ,  $t_{1/2} = 271,79 \text{ dní}$

Výsledek:  $A_t = 8,17 \text{ kBq}$

#### 5.4. Obecný výpočet deklarované aktivity různě velkých filtrů ( $^{99m}\text{Tc}$ , $^{111}\text{In}$ )

Při určování aktivity různě velkých filtračních papírů jsem filtry rozdělil do dvou skupin. První skupina byly filtry o rozměrech 2x2 cm a 5x5 cm, do druhé skupiny patřily filtry o velikosti 10x10 cm a 11x15 cm.

Vzorky o rozměrech 2x2 a 5x5 cm jsem změřil přímo ve studnovém scintilačním detektoru (jako vyhodnocovací jednotky jsem používal JKA 300 a JKA 1102), z naměřených hodnot počtu impulsů za 30 sekund jsem spočítal průměr a odečetl pozadí. Dále jsem tuto průměrnou hodnotu bez pozadí přepočítal na počet impulsů za sekundu a vydělil detekční účinností detektoru. Detekční účinnost detektoru se udává v jednotkách impulsy za sekundu (cps) lomeno Becquerel a je ovlivněna objemovou závislostí detektoru tak, že při zvětšujícím se objemu se detekční účinnost snižuje. Při měření jsem postupoval takovým způsobem, že jsem filtry smotal do zkumavky a pomocí pinzety co nejvíce zmenšil jejich objem, poté jsem odhadem stanovil objem ve zkumavce a přiřadil jemu odpovídající detekční účinnost, tedy 0,83 cps/Bq (filtr 2x2 cm) a 0,79 cps/Bq (filtr 5x5 cm) pro  $^{99m}\text{Tc}$  a 1,21 cps/Bq (filtr 2x2 cm) a 1,16 cps/Bq (filtr 5x5 cm) pro  $^{111}\text{In}$ . Pro  $^{99m}\text{Tc}$ , které jsem měřil na přístroji JKA 300, jsem použil detekční účinnost stanovenou pracovníky ÚNM. Pro  $^{111}\text{In}$ , které jsem měřil na přístroji JKA 1102, jsem detekční účinnost měřil sám. Postup měření byl následující. Nejdříve jsem změřil aktivitu roztoku  $^{111}\text{In}$  o objemu 1 ml v měřiči aktivit Bq 3. K datu 30.3.2009 a času 13:00 byl výsledek 4,8 MBq. Tuto deklarovanou aktivitu jsem přepočítal vzhledem k poločasů přeměny k datu a času měření téhož vzorku na spektrometru se studnovým detektorem podle vztahu A uvedeného výše (výsledek: 4920,55 Bq ke 27.4.2009, 13:00). Dále jsem změřil ve studnovém spektrometru počet impulsů pro 1ml vzorek  $^{111}\text{In}$  a pozadí. Výsledná hodnota měření na spektrometru se studnovým detektorem byla po odečtení pozadí 5955 impulsů za sekundu. Celková detekční účinnost pro roztok o objemu 1 ml byla tedy 1,21 cps/Bq.

Ve studnovém detektoru jsem změřil pouze filtry 2x2 cm a 5x5 cm, velké filtry jsem takto měřit nemohl (kvůli rozměrům by se nevešly do zkumavky), proto jsem u všech vzorků změřil počet impulsů za 30 sekund ve vzdálenosti 26 cm a 30 cm od studnového detektoru, spočítal průměr a odečetl pozadí. Na základě těchto hodnot (přepočteno na imp/s) jsem stanovil procentuální poměr aktivit jednotlivých vzorků. Pomocí procentuálního poměru

hodnot ve vzdálenosti od studnového spektrometru jsem stanovil aktivitu filtrů 10x10 cm a 11x15 cm.

V poslední fázi výpočtu jsem aktivitu k datu a času měření ve studnovém spektrometru přepočítal vzhledem k poločasů přeměny pro  $^{111}\text{In}$  na hodnotu aktivity k datu a času měření s přístrojem *MicroCont* a pro  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  na hodnotu aktivity k datu a času, ke kterému jsou přepočteny hodnoty v tabulkách (16.2., 9:45).

#### 5.4.1. Hodnoty aktivit filtrů pro $^{99\text{m}}\text{Tc}$ a $^{111}\text{In}$

Velikost filtru (cm x cm)	Deklarovaná aktivita (kBq)	Deklarovaná plošná aktivita (Bq/cm <sup>2</sup> )
2x2	10,55	2637,5
5x5	43,96	1758,4
10x10	151,66	1516,6
11x15	250,57	1518,6

Tab.5.1.: Deklarované aktivity filtrů  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  k datu 16.2.09 a času 9:45 (čas a datum, ke kterému jsem přepočítával naměřené hodnoty  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  uvedené v tabulce 5.3.). Vzhledem ke způsobu stanovení je aktivita určena s přesností cca  $\pm 10 \%$ .

Velikost filtru (cm x cm)	Deklarovaná aktivita (kBq)	Deklarovaná plošná aktivita (Bq/cm <sup>2</sup> )
2x2	0,761	190
5x5	2,357	94,4
10x10	7,528	75,3
11x15	11,796	71,5

Tab.5.2.: Deklarované aktivity filtrů  $^{111}\text{In}$  k datu a času měření plošné aktivity s přístrojem *MicroCont*. Vzhledem ke způsobu stanovení je aktivita určena s přesností cca  $\pm 10 \%$ .

## 5.5. Výsledky měření

V tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty veličin pěti měření minus aritmetický průměr pozadí.

Poločas přeměny  $^{99m}\text{Tc}$  je 6,01 hodiny. Měření probíhalo několik hodin, proto jsem hodnoty přepočítal k určitému datu a času (16.2., 9:45), abych je mezi sebou mohl porovnávat. U  $^{57}\text{Co}$  (poločas přeměny 270,9 dní),  $^{131}\text{I}$  ( $t_{1/2} = 8,04$  dní) a  $^{111}\text{In}$  ( $t_{1/2} = 2,83$  dní) jsem hodnoty nepřepočítával, neboť měření se uskutečnilo během několika hodin. Pro přepočet hodnot  $^{99m}\text{Tc}$  jsem použil vztah:

$$Y = X / 0,5^n$$

Kde:

Y je průměrná hodnota pěti měření přepočtená k určitému datu a času (buď 16.2., 9:45, nebo 10.2., 12:00),

X je aritmetický průměr pěti hodnot naměřených přístrojem,

$$n = t/t_{1/2} ,$$

t je čas v hodinách mezi datem a časem měření a datem a časem, ke kterému jsem počítal všechny hodnoty,

$t_{1/2}$  je poločas přeměny (pro  $^{99m}\text{Tc}$  6,01 hodiny).

Výsledky měření jsem shrnul do dvou základních tabulek (dále jsem sestrojil několik doplňujících tabulek). První tabulka (tab.5.3.) se zabývá vlivem velikosti kontaminované plochy na odezvu přístroje. Druhá tabulka (tab.5.4.) znázorňuje odezvu přístroje v závislosti na typu radionuklidu pro malé kontaminované plochy (do 4 cm<sup>2</sup>). V tabulce je také hodnota deklarované aktivity vzorku, která je získána buďto výpočtem z certifikátů etalonů ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ), nebo stanovena podle „kalibračního“ vzorku v měřiči aktivity Bq3 ( $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ). Výpočet aktivit je popsán v kapitolách 5.3. a 5.4.



Radio-nuklid	Velikost filtru (cmxcm)	PTR 12 G– příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv/h}$ )*	FH 40 G-L– příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv/h}$ )*	Plošná aktivita ( $\text{Bq/cm}^2$ )*	Četnost impulsů (imp/s)*	Naměřená aktivita ( $\text{kBq}$ )*
<sup>99m</sup> Tc první série	2x2	0,58	0,33	23,24	232,33	5,415
	5x5	1,64	1,37	102,71	1148,40	23,931
	10x10	4,00	3,83	328,90	3750,48	76,634
	11x15	5,42	5,45	556,32	6195,55	129,623
<sup>99m</sup> Tc druhá série	Velikost filtru (cmxcm)	PTR 12 G–příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv/h}$ **)	FH 40 G-L–příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv/h}$ **)	Plošná aktivita ( $\text{Bq/cm}^2$ **)	Četnost impulsů (imp/s)**	Naměřená aktivita ( $\text{kBq}$ **)
	2x2	0,19	0,09	8,36	79,33	1,948
	5x5	0,62	0,45	36,69	361,10	8,549
	10x10	1,57	1,24	119,42	1205,99	27,825
<sup>111</sup> In	11x15	1,35	1,43	183,39	1847,26	42,730
	Velikost filtru (cmxcm)	PTR 12G–příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv/h}$ )	FH 40 G-L–příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Plošná aktivita ( $\text{Bq/cm}^2$ )	Četnost impulsů (imp/s)	Naměřená aktivita ( $\text{kBq}$ )
	2x2	0,10	0,05	1,30	29,40	0,304
	5x5	0,21	0,12	3,79	96,80	0,883
	10x10	0,40	0,31	12,16	304,20	2,834
	11x15	0,45	0,42	21,36	532,60	4,978

\* – přepočtené hodnoty k 10.2. 12:00  
\*\* – přepočtené hodnoty k 16.2. 9:45

Tab.5.3.: Výsledky měření různě velkých filtrů

Radio-nuklid	Příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv/h}$ ) PTR 12 G	Příkon dávkového ekvivalentu ( $\mu\text{Sv/h}$ ) FH 40 G-L	Četnost impulsů (imp/s)	Naměřená plošná aktivita ( $\text{Bq/cm}^2$ )	Deklarovaná plošná aktivita ( $\text{Bq/cm}^2$ )	Naměřená aktivita ( $\text{kBq}$ )	Deklarovaná aktivita ( $\text{kBq}$ )
<sup>131</sup> I	86,61	50,67	7594,7	143,70	582400*	33,483	2330*
<sup>99m</sup> Tc**	0,19	0,09	79,3	8,36	2638	1,948	10,55
<sup>111</sup> In	0,10	0,05	29,4	1,30	190*	0,304	0,76*
<sup>57</sup> Co	0,36	0,07	81,8	4,23	16340*	0,985	8,17*

\* Přepočtená hodnota – aktivita v době měření přístrojem *MicroCont* v modu plošné aktivity  
\*\* Hodnoty jsou přepočtené k datu 16.2. a času 9:45

Tab.5.4.: Vliv typu radionuklidu a malé plochy na měření plošné kontaminace. Plocha radionuklidů je do 4  $\text{cm}^2$ .

## 5.6. Zhodnocení a diskuse výsledků

### 5.6.1. Měření různě velkých ploch zamoření

Pro porovnání vztahu mezi veličinami příkon dávkového ekvivalentu a plošná aktivita jsem sestrojil dvě tabulky (tab.5.5. pro přístroj *FH 40 G-L*, tab.5.6. pro *PTR 12 G*), které znázorňují poměr plošné aktivity ku příkonu dávkového ekvivalentu ( $\text{Bq/cm}^2:\mu\text{Sv/h}$ ), tedy kolika  $\text{Bq/cm}^2$  odpovídá  $1 \mu\text{Sv}$ . Dále je zde sloupec, který ukazuje poměr mezi impulsy za sekundu a příkonem dávkového ekvivalentu ( $\text{imp/s}:\mu\text{Sv/h}$ ), tedy kolik impulsů za jednotku času odpovídá  $1 \mu\text{Sv}$ . Četnost impulsů je v relaci s hodnotami plošné aktivity násobenými určitou konstantou. Výpočtem z mých výsledků je tato konstanta rovna (po zaokrouhlení na celá čísla) pro  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  10 a pro  $^{111}\text{In}$  25. Před začátkem měření s přístrojem *MicroCont* volíme typ měřeného radionuklidu. Tímto nastavením vlastně volíme onu konstantu pro přepočítání z hodnot impulsů za sekundu. Ovšem jak ukazují výsledky mé práce níže, je tato kompenzace závislosti měření na typu radionuklidu poněkud nedostatečná.

Tabulky jsem sestrojil dvě, protože odezva přístrojů *PTR 12 G* a *FH 40 G-L* se liší a to především pro malé kontaminované plochy. Je to způsobeno různou velikostí detektorů, rozdílnou geometrií měření a odlišným umístěním mechanických filtrů pro kompenzaci energetické závislosti detektoru (viz kapitola 3.4.).

<b>MicroCont / FH 40 G-L</b>			
Radionuklid	Velikost filtru (cmxcm)	Plošná aktivita ( $\text{Bq/cm}^2$ )	Četnost impulsů (imp/s)
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ první série	2x2	70,4	704,0
	5x5	75,0	838,2
	10x10	85,9	979,2
	11x15	102,1	1136,8
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ druhá série	2x2	89,0	843,9
	5x5	81,2	799,4
	10x10	96,3	972,6
	11x15	128,2	1291,8
$^{111}\text{In}$	2x2	24,5	551,6
	5x5	31,2	795,4
	10x10	39,8	995,1
	11x15	51,2	1276,3

Tab.5.5.: Jak  $1 \mu\text{Sv/h}$  odpovídá ostatním jednotkám (poměr přístrojů *MicroCont* a *FH 40 G-L*)

<b>MicroCont / PTR 12 G</b>			
Radionuklid	Velikost filtru (cmxcm)	Plošná aktivita (Bq/cm <sup>2</sup> )	Četnost impulsů (imp/s)
<sup>99m</sup> Tc první série	2x2	40,2	402,0
	5x5	62,6	700,2
	10x10	82,2	937,7
	11x15	102,6	1143,1
<sup>99m</sup> Tc druhá série	2x2	45,0	426,7
	5x5	59,6	586,6
	10x10	76,1	768,1
	11x15	135,8	1368,3
<sup>111</sup> In	2x2	13,6	306,3
	5x5	18,2	465,4
	10x10	30,1	753,0
	11x15	47,7	1188,8

Tab.5.6.: Jak 1  $\mu\text{Sv/h}$  odpovídá ostatním jednotkám (poměr přístrojů *MicroCont* a *PTR 12 G*)

Z tabulek je zřejmé, že plocha zamořeného místa hodnotu měřené kontaminace ovlivňuje. V programu monitorování ÚNM 1.LF a VFN jsou uvedeny obě jednotky ( $\mu\text{Sv/h}$  a  $\text{Bq/cm}^2$ ) s tím, že osoba měřící kontaminaci si může vybrat, jakým přístrojem – ve které z těchto dvou jednotek – bude zamoření měřit. Z toho vyplývá, že *i poměry mezi těmito jednotkami by měly být konstantní u všech filtrů bez ohledu na jejich velikost.*

V tabulce 5.5. pro přístroj *FH 40 G-L* však vidíme, že pro filtrační papír z první série technecia, který znázorňuje zamořenou plochu o velikosti  $4 \text{ cm}^2$ , odpovídá  $1 \mu\text{Sv/h}$  přibližně  $70 \text{ Bq/cm}^2$ . Ovšem pro filtrační papír o velikosti  $11 \times 15 \text{ cm}$  je  $1 \mu\text{Sv/h}$  roven přibližně  $102 \text{ Bq/cm}^2$ . Tyto dvě hodnoty se liší zhruba o jednu polovinu. Pokud vezmeme tabulku pro přístroj *PTR 12 G*, vidíme že hodnota pro nejmenší filtr z první série <sup>99m</sup>Tc je dvaapůlkrát menší než hodnota pro filtr o největší ploše.

Poměry  $\text{Bq/cm}^2:\mu\text{Sv/h}$  pro druhou sérii technecia jsou pro přístroj *FH 40 G-L* (tab.5.5.) velmi podobné (tedy přibližně 1,5) a pro *PTR 12 G* (tab.5.6.) je hodnota filtru  $11 \times 15 \text{ cm}$  třikrát větší než hodnota filtru  $2 \times 2 \text{ cm}$ .

Největší rozdíly hodnot pro velkou a malou zamořenou plochu jsou vidět při měření <sup>111</sup>In, kde je poměr hodnot pro filtr  $11 \times 15 \text{ cm}$  a filtr  $2 \times 2 \text{ cm}$  roven přibližně dvě pro přístroj *FH 40 G-L* a přibližně 3,5 pro přístroj *PTR 12 G*.

Poměr  $\text{Bq/cm}^2:\mu\text{Sv/h}$  tedy ukazuje, že hodnoty naměřené měřičem příkonu dávkového ekvivalentu a měřičem plošné aktivity jsou závislé na ploše zamořeného místa a může vznikat poměrně velká chyba měření.

Porovnáme-li poměr  $\text{Bq/cm}^2:\mu\text{Sv/h}$  pro  $^{111}\text{In}$  a  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , ukáže se, že není lhostejné jaký radionuklid měříme.  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  patří podle programu monitorování do třídy radiotoxicity 3,  $^{111}\text{In}$  do třídy 2, z tohoto důvodu jsou referenční úrovně v jednotkách  $\text{Bq/cm}^2$  pro  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  desetkrát vyšší.

Vzeme-li hodnoty plošné aktivity z tabulky 5.5. a uděláme poměr průměrné hodnoty dvou sérií technecia ku indiu pro velikost filtrů  $2 \times 2$  cm, dostaneme hodnotu 3,3. Uděláme-li tentýž poměr z tabulky 5.6., tedy z hodnot přístroje *PTR 12 G*, dostaneme hodnotu 3,1.

Pokud uděláme obdobné poměry pro největší filtry ( $11 \times 15$  cm) získáme výsledky 2,2 (z tab.5.5. –  $\mu\text{Sv/h}$  měřeny přístrojem *FH 40 G-L*) a 2,5 (z tab.5.6. –  $\mu\text{Sv/h}$  měřeny *PTR 12 G*). Podle tabulek z programu monitorování (tab.2.2., tab.2.5.) by měl být tento poměr roven 10. Z mého experimentu plyne závěr, že je tento poměr minimálně třikrát menší.

Výsledky ukazují, že není lhostejné jaký radionuklid měříme a upozorňují na poněkud podivuhodné rozdělení referenčních úrovní podle třídy radiotoxicity, které nacházíme v programu monitorování (a ve vyhlášce SÚJB).

### 5.6.2. Měření zamoření malých ploch

Přístroje používané na pracovištích nukleární medicíny musí být dle zákona pravidelně kontrolovány v Českém metrologickém institutu (ČMI) na Inspektorátu pro ionizující záření. Přístroj *MicroCont* se posílá ke kontrole zpravidla jednou za dva roky, poslední kontrola proběhla v září roku 2008. Přístroj, kterým jsem měřil je tedy úředně ověřen ve smyslu zákona č. 505/90 Sb. Ovšem výsledky z tabulky 5.4. jsou zarážející a ukazují na možnou chybu při měření aktivity až o několik řádů.

Záměrně jsem při měření použil radionuklidy o malé ploše (do  $4 \text{ cm}^2$ ), jelikož jsem předpokládal, že měření pro ně nebude přesné. V tabulce 5.4. jsou důležité především hodnoty plošné aktivity a aktivity naměřené přístrojem *MicroCont* a hodnoty deklarované aktivity – stanovené výpočtem z certifikátů použitých etalonů ( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ) nebo měřením základního roztoku v měřiči aktivit  $\text{Bq}$  3. Dále jsou v tabulce hodnoty deklarované plošné aktivity (v  $\text{Bq/cm}^2$ ), kterou jsem stanovil jako deklarovanou aktivitu dělenou plochou měřeného vzorku (v  $\text{cm}^2$ ). Hodnota deklarované plošné aktivity by se měla rovnat plošné aktivitě naměřené přístrojem, ale v tabulce vidíme, že tomu tak není – a to o několik řádů. To ukazuje, že měření malých kontaminovaných ploch přístrojem *MicroCont* v modu plošné aktivity je

zatíženo velkou chybou. Tato chyba spočívá v tom, že přístroj počítá plošnou aktivitu jako hodnotu aktivity dělenou konstantou 233, to ale znamená, že přístroj by měl změřit plošnou aktivitu správně (v porovnání s naměřenou aktivitou), pouze má-li zamořený povrch plochu 233 cm<sup>2</sup>. Avšak pokud měříme kontaminaci, tak většinou nevíme, jak je zamořená plocha velká (často se jedná o kapku radioaktivního roztoku) a v tomto případě je velmi chybné měřit přístrojem *MicroCont* v jednotkách Bq/cm<sup>2</sup>.

Obdobné závěry o špatné přesnosti měření vyplývají i z ověřovacího listu ČMI – inspektorát pro ionizující záření. Přístroj je sice úředně ověřen, avšak při měření plošné aktivity například <sup>99m</sup>Tc je odchylka od deklarované hodnoty -62 % a pro <sup>131</sup>I 33,5 % s tím, že v obou případech byly měřeny etalony o relativně velké ploše (100 nebo 165 cm<sup>2</sup>).

**Tabulka č. 2 Naměřené odezvy pro režimy (podrozsahy) měřidla**

Nuklid	Dekl. akt. Bq Bq/cm2	Odezvy měřidla			Odch. (%) Bq Bq/cm2
		cps	Bq	Bq/cm2	
14C	3890	125,4		9,944	-38,6
NM 951	16,69		2387		-40,4
32P	12782	4689		58,86	8,5
092/2/06	54,86		13871		7,3
57Co	243099	7557		381,6	-63,3
369/06	1043,34		89200		-63,4
60Co	4756	713,0		22,71	13,4
850006	20,41		5392		11,3
90Sr+Y	7326	2424		30	-2,3
NM 954	31,44		7154		-4,6
99mTc	535321	8134		873,3	-62,0
408/06	2298		203257		-62,0
125 I	61969	2760		236,3	-11,6
695/05	266,0		54757		-11,2
131 I	56014	8581		159,9	-33,7
324/06	240,40		37157		-33,5
137Cs	2876	755,2		12,64	4,8
NM 950	12,34		3015		2,4

Poznámka: odchylka =  $(A_{(NAM.)} - A_{(DEKL.)} / A_{(DEKL.)} \cdot 100(\%)$ ;

Tab.5.7.: Tabulka výsledků měření z ověřovacího listu ČMI z roku 2006. Jsou zde uvedeny <sup>131</sup>I a <sup>99m</sup>Tc, které jsem používal pro experimenty této práce (na ověřovacím listu z roku 2008 jsou měřeny jiné radionuklidy).<sup>[13]</sup>

Nuklidy v tabulce označené NM jsou etalony o ploše 100 cm<sup>2</sup>, ostatní mají plochu 165 cm<sup>2</sup>. Avšak ve sloupečku deklarované aktivity se na tento fakt nebere ohled a všechny hodnoty v jednotkách Bq/cm<sup>2</sup> jsou ve skutečnosti hodnoty aktivity v Bq vydělené konstantou 233. Zde

je ovšem nutné poznamenat, že při výpočtu plošné aktivity platí matematický vztah: Aktivita vzorku dělená plochou vzorku, nikoli vztah aktivita dělená číslem 233.

Také je důležité si uvědomit, že odchylka udávaná v tabulce je počítána podle vztahu uvedeného pod tabulkou, tedy:

$$\text{Odchylka} = (A_{\text{nam}} - A_{\text{dekl}}) / (A_{\text{dekl}}) \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Kde:

$A_{\text{nam}}$  je naměřená hodnota aktivity,

$A_{\text{dekl}}$  je deklarovaná aktivita.

Vezmeme-li jako příklad  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , pro které je deklarovaná aktivita 535,3 kBq a naměřená aktivita 203,3 kBq, vychází podle výše uvedeného vztahu odchylka  $-62 \%$ . Jenže z úplně stejných čísel můžeme říct, že hodnota deklarované aktivity je více než dvaapůlkrát větší než hodnota naměřená, což může pomoci k objasnění výsledků v tabulce 5.4.

Cílem této práce je ukázat závislost měření plošné kontaminace na ploše a typu měřeného radionuklidu. Zamýšlím se zde nad výsledky měření své práce (obhajuji výsledky uvedené v tabulce 5.4.) ve srovnání s výsledky práce ČMI.

### 5.6.3. Aktivita v závislosti na velikosti plochy

Pro porovnání deklarovaných aktivit změřených ve studnovém spektrometru a hodnot aktivity a plošné aktivity naměřených přístrojem *MicroCont* jsem sestavil tabulku 5.8.

Radio-nuklid	Velikost filtru (cmxcm)	Naměřená plošná aktivita (Bq/cm <sup>2</sup> )*	Deklarovaná plošná aktivita (Bq/cm <sup>2</sup> )*	Četnost impulsů (imp/s)*	Naměřená aktivita (kBq) *	Deklarovaná aktivita (kBq)*
<sup>99m</sup> Tc druhá série	2x2	8,36	2637,5	79,33	1,95	10,55
	5x5	36,69	1758,4	361,10	8,55	43,96
	10x10	119,42	1516,6	1205,99	27,82	151,66
	11x15	183,39	1518,6	1847,26	42,73	250,57
Radio-nuklid	Velikost filtru (cmxcm)	Naměřená plošná aktivita (Bq/cm <sup>2</sup> )	Deklarovaná plošná aktivita (Bq/cm <sup>2</sup> )	Četnost impulsů (imp/s)	Naměřená aktivita (kBq)	Deklarovaná aktivita (kBq)
<sup>111</sup> In	2x2	1,30	190	29,40	0,30	0,76
	5x5	3,79	94,4	96,80	0,88	2,36
	10x10	12,16	75,3	304,20	2,83	7,53
	11x15	21,36	71,5	532,60	4,98	11,8
*- přepočtené hodnoty k 16.2. 9:45						

Tab.5.8.: Odezvy z přístroje *MicroCont* a deklarovaná aktivita vzorku.

Tabulka dává zajímavé výsledky. Vezmeme-li hodnoty aktivity naměřené přístrojem *MicroCont* a hodnoty deklarované aktivity a uděláme mezi nimi procentuální poměr pro jednotlivé velikosti měřených filtrů, získáme pro jednotlivé radionuklidy víceméně konstantní výsledky. Odezva z přístroje *MicroCont* je pro <sup>99m</sup>Tc v procentuálním rozmezí 17 – 19 % deklarované aktivity a pro <sup>111</sup>In je naměřená odezva přístroje zhruba 37 – 42 % aktivity deklarované. Tento výsledek značí, že měřená aktivita (nikoli však plošná aktivita) je jen velmi málo závislá na velikosti vzorku v důsledku geometrické závislosti detektoru (viz kap. 3.4.). Avšak odezvy z přístroje *MicroCont* jsou nízké, pro <sup>99m</sup>Tc zhruba pětapůlkrát menší než hodnota deklarovaná, pro <sup>111</sup>In přibližně dvaapůlkrát.

Jiné výsledky však dostaneme, spočítáme-li kolika procentům deklarované plošné aktivity odpovídá plošná aktivita naměřená přístrojem *MicroCont*. Výsledky jsou zářející. Naměřená hodnota plošné aktivity <sup>99m</sup>Tc pro filtr 2x2 cm odpovídá pouze 0,3 % deklarované plošné aktivity, pro filtr 5x5 cm 2 %, pro filtr 10x10 7,9 % a pro filtr 11x15 cm 12 % deklarované plošné aktivity. Naměřená plošná aktivita <sup>111</sup>In odpovídá pro filtr 2x2 pouze 0,7 % deklarované plošné aktivity, pro filtr 5x5 cm 4 %, pro filtr 10x10 cm 16% a pro filtr

11x15 30 % deklarované plošné aktivity. Z těchto výsledků je zcela zřejmé, že odezva přístroje v modu plošné aktivity je závislá na velikosti vzorku a typu radionuklidu (pro  $^{111}\text{In}$  jsou výsledky příznivější). Výsledky ale především značí, že při měření plošné kontaminace bez předchozího určení velikosti zamořené plochy může vznikat chyba až o více než dva řády.

#### 5.6.4. Shrnutí vyhodnocených výsledků

Na základě experimentálních výsledků je třeba odpovědět na čtyři základní otázky týkající se zadání mé práce:

1) Do jaké míry spolu souvisí jednotky  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$  a  $\text{Bq.cm}^{-2}$  a je vůbec smysluplné měřit plošné zamoření v  $\text{Bq/cm}^2$  pro jednotlivé radionuklidy bez předchozího určení velikosti zamořené plochy?

2) Ovlivňuje měření plošné kontaminace – vzhledem k programu monitorování – typ radionuklidu, který měříme?

3) Vyplývají z výsledků práce podmínky, za kterých jsou hodnoty naměřené v  $\text{Bq.cm}^{-2}$  platné?

4) Jaké jsou výhody a nevýhody měření příkonu dávkového ekvivalentu (přístroji *PTR 12 G* a *FH 40 G-L*) a plošné kontaminace přístrojem *MicroCont*?

Na první otázku nejlépe odpovídají výsledky z tabulek 5.5. a 5.6., které znázorňují přímo kolika  $\text{Bq.cm}^{-2}$  odpovídá  $1 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ . Tímto jsem stanovil alespoň poměrový vztah mezi veličinami. Zcela jasný a konstantní vztah typu  $1 \mu\text{Sv.h}^{-1}$  odpovídá hodnotě  $x \text{ Bq.cm}^{-2}$  určit nelze, jelikož tento poměr je velmi závislý na velikosti zamořené plochy a typu radionuklidu. To samo již značí, že udávat referenční úrovně bez ohledu na velikost zamořené plochy v  $\text{Bq.cm}^{-2}$  je nepřesné. Tato nepřesnost je nejlépe vidět na výsledcích uvedených v tabulce 5.4., která uvádí hodnoty měření malých ploch (do  $4 \text{ cm}^2$ ) a kde je hodnota plošné aktivity naměřené přístrojem až o tři řády nižší než deklarovaná hodnota plošné aktivity. Vezměme jako příklad, že budeme měřit v kontrolovaném pásmu velmi malou plochu (do  $4 \text{ cm}^2$  – kapku radioaktivního roztoku) zamořenou  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  a naměříme přístrojem *MicroCont* hodnotu například  $2 \text{ Bq/cm}^2$ . To ovšem znamená – podle výsledků mého měření – že skutečná plošná aktivity tohoto zamořeného místa může být o více než 2,5 řádu vyšší, tedy i více než  $630 \text{ Bq/cm}^2$ . Podíváme-li se do tabulky referenčních úrovní programu monitorování



(tab.2.5.) – vycházející z vyhlášky SÚJB č. 307/2002 sb., o radiační ochraně – vidíme, že referenční záznamová úroveň pro kontrolované pásmo je  $30 \text{ Bq/cm}^2$ . V našem případě jsme tedy s  $2 \text{ Bq/cm}^2$  pod touto úrovní a zaznamenávat nic nemusíme. Jenže mé výsledky ukazují, že skutečná hodnota (kterou bychom dostali například měřením stěru v měřiči aktivity – také jeden ze způsobů měření kontaminace) může být přes  $630 \text{ Bq/cm}^2$ , což je hodnota přesahující více než dvakrát hodnotu referenční zásahové úrovně. Při překročení této úrovně je dohlížející pracovník povinen sepsat protokol o této události a odeslat ho do SÚJB.

Závislost typu radionuklidu při měření kontaminace a následného vyhodnocování výsledků je korigována dvěma způsoby. Prvním způsobem korekce je možnost nastavit typ měřeného radionuklidu na přístroji, druhým způsobem korekce jsou různé hodnoty uvolňovacích úrovní na základě čtyř tříd radiotoxicity, které udává SÚJB ve vyhlášce č. 307/2002 sb., o radiační ochraně (viz příloha č.2). Nicméně výsledky mé práce ukazují, že tyto „korekční mechanismy“ jsou nedostatečné. Podíváme-li se na hodnoty plošné aktivity z tabulky 5.5. a uděláme poměr průměrné hodnoty dvou sérií  $^{99m}\text{Tc}$  (třída radiotoxicity 3) ku  $^{111}\text{In}$  (třída radiotoxicity 2) pro velikost filtrů  $2 \times 2 \text{ cm}$ , dostaneme hodnotu 3,3, pokud uděláme tento poměr z tabulky 5.6., tedy z hodnot přístroje *PTR 12 G*, dostaneme hodnotu 3,1. Jenže výsledky měření jednotlivých radionuklidů z třídy radiotoxicity 3 a 2 by se podle programu monitorování měly lišit desetkrát, nikoli třikrát. Z mých výsledků tedy plyne odpověď na druhou otázku: měření plošné aktivity – vzhledem k programu monitorování – je ovlivněno typem radionuklidu, který měříme.

Odpověď na třetí otázku není zcela jednoznačná. Nicméně můžeme říci, že měření plošné kontaminace pro program monitorování by bylo přesné pouze za těchto omezujících podmínek:

- 1) Tabulky referenčních úrovní jsou stanoveny pro různé plochy, nebo alespoň různá rozmezí ploch.
- 2) Jsou sestaveny zvláštní tabulky pro jednotlivé radionuklidy.

Další možností pro zpřesnění měření kontaminace na pracovištích nukleární medicíny je neudávat hodnoty v  $\text{Bq.cm}^{-2}$ , nýbrž pouze v  $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ , popřípadě při měření přístrojem *MicroCont* v jiných jednotkách, jako je například celková aktivita nebo počet impulsů za sekundu. Udávat referenční úrovně ve veličině celkové aktivity by také nebylo zcela přesné, ale odezva by byla relativně málo závislá na velikosti plochy, jak ukazuje tabulka 5.8. (poměr mezi deklarovanou aktivitou a naměřenou aktivitou). Ovšem hodnoty aktivity naměřené přístrojem v kBq jsou několikrát nižší než hodnota deklarovaná (pro  $^{99m}\text{Tc}$  přibližně

pětapůlkrát a pro  $^{111}\text{In}$  přibližně dvaapůlkrát). Se znalostí této skutečnosti lze však pro zvolený radionuklid stanovit tabulku referenčních úrovní.

Odpověď na čtvrtou otázku není jednoduché. V první řadě je důležité zmínit, že měření kontaminace a radioaktivity v terénu je složité. Přenosné přístroje většinou neměří tak přesně (ani do jisté míry nemusí) jako například měřiče aktivity – ionizační komory – používané k přesnému určení aktivity radiofarmaka po jeho výrobě před podáním pacientovi. U ionizačních komor nastavujeme před začátkem měření, jaký typ radionuklidu měříme. Tato možnost u přenosných přístrojů často není (jako je tomu u přístrojů *PTR 12 G* a *FH 40 G-L*) a přístroj se snaží tuto nepřesnost korigovat jiným způsobem, například mechanickými filtry. Přístroj *MicroCont* možnost nastavení měřeného radionuklidu má a závěry této práce neodpovídají na otázku, zda je tato korekce funkční (přístroj je ověřen ČMI), pouze ukazují na fakt, že se výsledky neshodují s rozdělením referenčních úrovní podle tříd radiotoxicity v programu monitorování. Další velmi důležitou vlastností každého přístroje je citlivost. Tuto vlastnost naopak hodnotím u přístroje *MicroCont* velmi kladně. To můžeme vidět v tabulkách výsledků této práce na výsledných hodnotách pro malé filtry. Tam kde přístroje *PTR 12 G* a *FH 40 G-L* teprve začínají měřit (hodnoty v řádech několika setin  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  – tedy na úrovni pozadí), je velkoplošný detektor přístroje *MicroCont* schopen měřit citlivěji a snadno zobrazí hodnotu, která vystupuje nad pozadí. Přístroj *MicroCont* je tedy velice vhodný pro nalezení zamořeného povrchu, či oděvu a také pro určení místa nejvyšší odezvy, nad kterým by se podle programu monitorování mělo měřit. Přenosnými měřiči příkonu dávkového ekvivalentu je možné zkontrolovat zamoření ploch a oděvů na úrovni jednotek nebo desítek kBq, zatímco měřičem zamoření typu *MicroCont* je možno měřit plošné zamoření v desítkách případně jednotkách Bq. Je tedy o dva až tři řády citlivější a v tom je jeho velká výhoda. Uplatní se tedy například při kontrole uvolňovacích úrovní prádla nebo velikosti či rychlosti dekontaminace zamořených ploch.

## 6. Závěr

Výsledky experimentálních prací s vybranými radionuklidy ukázaly, že pro kvantitativní hodnocení kontaminace pracovních oděvů, pracovních ploch a prádla není jednoznačný vztah mezi jednotkami  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  a  $\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Referenční úrovně v programu monitorování by měly být uváděny v  $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$  a pro vybraný radionuklid (podle typu pracoviště například  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  nebo  $^{131}\text{I}$ ) doplněny o hodnoty celkové aktivity naměřené za definovaných podmínek s měřičem zamoření typu *MicroCont*. Měřiče zamoření typu *MicroCont* by měly být dále vzhledem ke své velké citlivosti používány pro rutinní kontrolu a lokalizaci zamořené plochy. Jako základ při hodnocení zamoření by mohlo být pozadí naměřené měřičem na „nezamořené“ ploše.

## 7. Seznam literatury

1. VRÁNA, Václav, NOVÁKOVÁ, Olga. *Program monitorování pro klinický provoz zdrojů ionizujícího záření v Ústavu nukleární medicíny VFN*. Praha : [s.n.], 2004. 23 s.
2. ZÍDEK, Vlastimil. *PTR 12 G - návod k obsluze a údržbě*. Praha : [s.n.], 2001. 5 s.
3. *Rados MicroCont verze H 13422 : Provozní pokyny*. [s.l.] : [s.n.], 2001. 14 s.
4. *FH 40 G-L Dose Rate Measuring Unit : Operating instructions*. Erlagen : ESM Eberline Instruments GmbH, 2000. 83 s.
5. NOVÁKOVÁ, Olga, KUPKA, Karel, VRÁNA, Václav. *Detekce ionizujícího záření v nukleární medicíně*. Praha : [s.n.], 2003. 67 s.
6. CHERRY, Simon, SORENSON, James, PHELPS, Michael. *Physics in Nuclear Medicine*. Allan Ross. 3rd edition. Philadelphia : Elsevier Science, 2003. 523 s. ISBN 0-7216-8341-X.
7. ULLMANN, Vojtěch. *AstroNuklFyzika : Jaderná a radiační fyzika, nukleární medicína, radioisotopy* [online]. [2000] [cit. 2009-03-28]. Dostupný z WWW: <<http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>>.
8. BENEŠ, Jiří, STRÁNSKÝ, Pravoslav, VÍTEK, František. *Základy lékařské biofyziky*. 1. vyd. Praha : Karolinum, 2006. 196 s. ISBN 80-246-1009-4.
9. NAVRÁTIL, Leoš, ROSINA, Jozef. *Medicínská biofyzika*. Praha : Grada Publishing, 2005. 524 s. ISBN 80-247-1152-4.
10. KUPKA, Karel, KUBINYI, Jozef, ŠÁMAL, Martin. *Nukleární medicína*. 1. vyd. Příbram : P3K, 2007. 198 s. ISBN 978-80903584-9-2.
11. *Zákon č. 18/97 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 sb., o radiační ochraně*.
12. *The Berkeley Laboratory Isotopes Project's : Exploring the Table of Isotopes* [online]. [1990] , Last updated May 22, 2000 [cit. 2009-03-15]. Text v angličtině. Dostupný z WWW: <<http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm>>.
13. *Ověřovací list ČMI – inspektorát pro ionizující záření č. 9051-OL-Z-U4822/2006 (měřidla MicroCont H13422 v.č. 892)*, 2006.

## 8. Seznam obrázků, tabulek a grafů

Tab.2.1.: Měsíční referenční úrovně pro osobní dozimetrii pracovníků.....	8
Tab.2.2.: Referenční úrovně plošné aktivity při kontrole kontaminace osob a pracovních oděvů.....	9
Tab.2.3.: Referenční úrovně příkonu dávkového ekvivalentu při kontrole kontaminace osob a pracovních oděvů.....	9
Tab.2.4.: Referenční úrovně příkonu dávkového ekvivalentu pro kontrolované a sledované pásmo.....	10
Tab.2.5.: Referenční úrovně plošné aktivity pro kontaminaci povrchů v kontrolovaném pásmu.....	10
Obr.3.1. Přístroje použité k měření.....	11
Graf 3.1.: Energetická závislost přístroje <i>FH 40 G-L</i> .....	13
Obr.3.2. Velikosti detektorů v jednotlivých přístrojích.....	14
Obr.4.1. Převzato z Ullmann, V.: <a href="http://astronuklfyzika.cz">astronuklfyzika.cz</a> <sup>[7]</sup> .....	17
Tab.5.1.: Deklarované aktivity filtrů <sup>99m</sup> Tc k datu 16.2.09 a času 9:45.....	23
Tab.5.2.: Deklarované aktivity filtrů <sup>111</sup> In k datu a času měření plošné aktivity s přístrojem <i>MicroCont</i> .....	23
Tab.5.3.: Výsledky měření různě velkých filtrů.....	25
Tab.5.4.: Vliv typu radionuklidu a malé plochy na měření plošné kontaminace.....	25
Tab.5.5.: Jak 1 $\mu\text{Sv/h}$ odpovídá ostatním jednotkám (poměr přístrojů <i>MicroCont</i> a <i>FH 40 G-L</i> ).....	26
Tab.5.6.: Jak 1 $\mu\text{Sv/h}$ odpovídá ostatním jednotkám (poměr přístrojů <i>MicroCont</i> a <i>PTR 12 G</i> ).....	27
Tab.5.7.: Tabulka výsledků měření z ověřovacího listu ČMI z roku 2006.....	29
Tab.5.8.: Odezvy z přístroje <i>MicroCont</i> a deklarovaná aktivita vzorku.....	31

## 9. Seznam použitých zkratk a symbolů

$A_t$ ... aktivita v čase  $t$

$A_0$ ... aktivita v čase  $t=0$

Bq... Becquerel (jednotka aktivity)

$\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ ...Becquerel vztažen na čtvereční centimetr (jednotka plošné aktivity)

cps... počet impulsů za sekundu

ČMI... Český metrologický institut

$dt$ ... proměnná času

$e^-$ ... elektron

$e^+$ ...pozitron

imp/s... počet impulsů za sekundu

J/ kg... joule vztažený na kilogram

keV... kiloelektronvolty (jednotka energie radionuklidů)

kBq... kilobecquerel ( $10^3$  Bq)

$\lambda$  ...přeměnová konstanta

MeV...megaelektronvolty (jednotka energie radionuklidů)

MBq... megabecquerel ( $10^6$  Bq)

$\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ ... microsievvert za hodinu (jednotka příkonu dávkového ekvivalentu)

s... sekunda

SÚJB... Státní úřad pro jadernou bezpečnost

$t_{1/2}$ ...poločas rozpadu

ÚNM... Ústav nukleární medicíny

VFN... Všeobecná fakultní nemocnice

1. LF UK... 1. lékařská fakulta Univerzity Karlovy

$^3\text{H}$ ... izotop vodíku s hmotnostním číslem 3

$^{14}\text{C}$ ... izotop uhlíku s hmotnostním číslem 14

$^{57}\text{Co}$ ... izotop kobaltu s hmotnostním číslem 57

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ ... izotop technecia s hmotnostním číslem 99 v metastabilním stavu

$^{111}\text{In}$  ... izotop india s hmotnostním číslem 111

$^{131}\text{I}$ ... izotop jodu s hmotnostním číslem 131

## 10. Přílohy

### A) Příloha číslo 1

Tabulka uvolňovacích úrovní z vyhlášky SÚJB č. 307/2002 sb., o radiační ochraně.

Částka 113		Sbírka zákonů č. 307 / 2002		Strana 6413	
Příloha č. 2 k vyhlášce č. 307/2002 Sb.					
<b>Uvolňovací úrovně</b>					
<b>Tabulka č. 1</b>					
<b>Uvolňovací úrovně a směrné hodnoty pro radioaktivní kontaminaci materiálů a jejich povrchů</b>					
Pro radionuklidy neuvedené v tabulce nebo pro jiné způsoby uvádění radionuklidů do životního prostředí stanoví uvolňovací úrovně v případě potřeby Úřad.					
Posuzované místo znečištění	Třída radionuklidu podle tabulky č. 2				
	1	2	3	4	
	Uvolňovací úrovně hmotnostní aktivity [kBq/kg]				
Materiály, pevné látky a předměty vynášené z pracovišť se zdroji ionizujícího záření nebo jinak uváděné do životního prostředí	0,3	3	30	300	
	Uvolňovací úrovně plošné aktivity [kBq/m <sup>2</sup> ]				
Povrchy materiálů a předmětů vynášených z pracovišť se zdroji ionizujícího záření nebo jinak uváděných do životního prostředí	3	30	300	3000	
	Směrné hodnoty povrchové aktivity pro radioaktivní kontaminaci [kBq/m <sup>2</sup> ]				
Povrchy podlah, stěn, stropů, nábytku, zařízení, ap. v kontrolovaném pásmu pracovišť s otevřenými zářiči, Vnější povrchy ochranného a provozního zařízení, osobních ochranných prostředků	30	300	3000	3.10 <sup>4</sup>	
Povrch těla a vnitřní povrchy osobních ochranných prostředků Pracovní povrchy mimo kontrolované pásmo	3	30	300	3000	

## B) Příloha číslo 2

Rozdělení radionuklidů podle radiotoxicity ve vyhlášce SÚJB č. 307/2002 sb., o radiační ochraně.

### Tabulka č. 2

#### Rozdělení radionuklidů do tříd podle radiotoxicity a potenciálního ohrožení zevním ozářením

Pro vybrané radionuklidy, označené značkou + ve druhém sloupci této tabulky a uvedené v tabulce č. 2 přílohy č. 1, se hodnoty uvolňovacích úrovní vztahují nejen na tyto radionuklidy samotné, ale reprezentují tyto radionuklidy v rovnováze s těmi jejich produkty radioaktivní přeměny, které jsou uvedeny v druhém sloupci tabulky č. 2 přílohy č. 1.

Třída	Radionuklidy
1	Na-22, Na-24, Mg-28, Al-26, Al-28, Cl-38, K-43, Ca-47, Sc-46, Sc-48, V-48, Mn-52, Mn-52m, Mn-54, Mn-56, Fe-52, Fe-59, Co-55, Co-56, Co-58, Co-60, Co-62m, Zn-65, Ga-68, Ga-72, Ge-68, As-74, Br-82, Rb-82m, Sr-82, Sr-85, Sr-92, Y-88, Zr-95, Nb-94, Nb-95, Nb-98, Mo-90, Mo-101, Tc-96, Ru-106+, Ag-108m+, Ag-110m, Sb-124, Te-131m, Te-132, Te-133m, Te-134, I-130, I-132, I-134, I-135, Cs-132, Cs-134, Cs-136, Cs-137+, Ba-140+, La-140, Eu-152, Eu-154, Tb-160, Hf-181, Ta-182, Os-185, Ir-190, Ir-192, Tl-200, Pb-210+, Bi-206, Bi-207, Po-203, Po-205, Po-207, Po-210, Ra-223+, Ra-224+, Ra-225, Ra-226+, Ra-228+, Ac-227, Ac-228, Th-228+, Th-229+, Th-230, Th-232, Pa-231, U-230+, U-232+, U-234, U-235+, U-236, U-238+, Np-237+, Pu-236, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242, Pu-244, Am-241, Am-242m+, Am-243+, Cm-243, Cm-244, Cm-245, Cm-246, Cm-247, Cm-248, Cf-248, Cf-252, Cf-254,
2	Be-7, C-11, F-18, K-42, Sc-47, Co-57, Cu-64, Ga-67, As-76, Se-75, Rb-83, Rb-86, Sr-85m, Sr-90+, Y-92, Zr-97+, Nb-97, Mo-93, Mo-99, Ru-97, Ru-103, Rh-105, Cd-115, In-111, In-113m, In-114m, In-115m, Sn-113, Sn-125, Sb-122, Sb-125, Te-123m, Te-133, I-125, I-126, I-129, I-131, Cs-129, Ba-133, Ce-139, Ce-141, Ce-143, Ce-144+, Nd-147, Nd-149, Eu-152m, Eu-155, Gd-153, Er-171, Sm-153, Yb-169, W-187, Ir-194, Pt-191, Au-198, Au-199, Hg-197, Hg-197m, Hg-203, Tl-201, Tl-202, Pb-203, Pb-212+, Bi-212+, Ra-227, Pa-233, Th-227, U-231, U-237, Np-239, Cm-242
3	C-14, P-32, Cl-36, Ca-41, Cr-51, As-77, Sr-89, Y-90, Y-91, Y-93, Zr-93+, Tc-96m, Tc-97m, Tc-99, Tc-99m, Pd-109, Ag-111, Cd-109, Cd-115m, Te-125m, Te-127m, Te-129, I-123, Cs-135, Pr-142, Pm-149, Dy-165, Dy-166, Ho-166, Gd-159, Tm-170, Yb-175, Lu-177, W-181, W-188, Re-186, Re-188, Os-191, Os-193, Pt-193, Pt-197, Pt-197m, Tl-204, Bi-210, At-211, Th-226, Th-231, Th-234+, U-239, Pu-234, Pu-235, Pu-237, Pu-241, Pu-243, Am-242, Bk-249, Cf-246, Cf-253
4	H-3, Si-31, P-33, S-35, Ca-45, Mn-53, Fe-55, Co-58m, Co-60m, Co-61, Ni-59, Ni-63, Zn-69, Ge-71, As-73, Nb-93m, Tc-97, Rh-103m, Pd-103, Te-127, Cs-131, Cs-134m, Pr-143, Pm-147, Er-169, Tm-171, W-185, Pt-193