

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Měření dávek při defektoskopických pracích (u fy Kulle Praha)  
pomocí elektronických případně termoluminiscenčních osobních  
dozimetrů**

*Vypracovala: Bc. Jana Šmoldasová*

*Vedoucí práce: Ing. Jan Singer, CSc.*

2008

## ***Abstract***

### **Dose measurement during defectoscopic work (in Kulle in Prague) using electronic or termoluminescence personal dosimeters.**

Personal monitoring of the external radiation of radiation personnel exposed to sources of ionizing radiation at a workplace is an important task of the radiological protection. Information based on the measured quantities characterising the level of the exposure of radiation personnel enable to assess the optimum radiological protection at the relevant workplace and ascertain any deviation from the normal operation in time. Different types of personal dosimeters are used to monitor the external radiation of radiation personnel. Basically, there are two types of dosimeters, passive and active (electronic). Passive dosimeters provide information on the dose of exposure after its evaluation, while electronic dosimeters provide this information instantly.

The goal of the diploma work is to compare data acquired during different working activities using the DMC 2000 XB electronic dosimeters and the passive film dosimeters currently used at the defectoscopic workplace of Kulle PK-Q, with its registered seat at Na Pokraji 2/540, Prague 9, Prosek. Based on the results of the personal monitoring of the external radiation of defectoscopic personnel using the film and electronic dosimeters and the determined advantages and disadvantages of these two dosimetric systems, the more advantageous dosimetric systems is recommended for the purpose of the personal monitoring of the personnel in the Kulla defectoscopic company.

**Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Měření dávek při defektoskopických pracích (u fy Kulle Praha) pomocí elektronických případně termoluminiscenčních osobních dozimetrů vypracovala samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s §47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích dne 8. července 2008

.....  
Bc. Jana Šmoldasová

### **Poděkování:**

Děkuji zejména vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Singerovi, CSc., za užitečné rady, připomínky a metodické vedení práce. Velmi děkuji také zaměstnancům Českého metrologického institutu – Inspektorátu pro ionizující záření v Praze, jmenovitě Ing. Vladimírovi Sochorovi za pomoc při ověření elektronických dozimetrů a změření jejich energetické závislosti, a dále Ing. Jaroslavovi Šolcovi, Ph.D., a Miloslavovi Králíkovi, CSc., kteří svými četnými podnětnými připomínkami přispěli ke konečné podobě této práce. Na závěr také děkuji Ing. Petru Kullemu za umožnění měření osobních dávek defektoskopických pracovníků v jeho firmě.

## Seznam zkratek

<b>ALARA</b>	As low as reasonably achievable
<b>CSOD</b>	Celostátní služba osobní dozimetrie
<b>CRPO</b>	Centrální registr profesionálních ozáření
<b>ČMI – IIZ</b>	Český metrologický institut – Inspektorát pro ionizující záření
<b>DMC 2000 XB</b>	název osobního elektronického dozimetru
<b>DOSIMASS</b>	Dosimeter Maintenance And Set-up Software
<b>EEC</b>	European energy community
<b>ED</b>	elektronický dozimetr
<b>FD</b>	filmový dozimetr
<b>Foma PMF</b>	personal monitoring film
<b>Foma PMF DF</b>	personal monitoring film, DF - vysoce citlivý film
<b>IAEA</b>	International Atomic Energy Agency
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>ICRP</b>	International Commission on Radiological Protection
<b>ICRU</b>	International Commission on Radiological Units and Measurements
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>MGP</b>	firma Merlin Gerin Product
<b>OSN</b>	Organizace spojených národů
<b>PMMA</b>	polymethylmethakrylát
<b>RTG lampy</b>	rentgenové lampy
<b>SÚJB</b>	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
<b>TLD</b>	termoluminiscenční dozimetr
<b>ZIZ</b>	zdroje ionizujícího záření
<b>ZL</b>	základní limity

## Seznam použitých symbolů

<b><math>D_{t,r}</math></b>	absorbovaná dávka ve tkáni nebo orgánu t
<b><math>H_t</math></b>	ekvivalentní dávka ve tkáni nebo orgánu t
<b><math>E</math></b>	efektivní dávka
<b><math>E_{50}</math></b>	úvazek efektivní dávky po dobu 50 let od příjmu radionuklidů
<b><math>E_{ef}</math></b>	efektivní energie
<b><math>S</math></b>	kolektivní dávka
<b><math>H_p(10)</math></b>	osobní dávkový ekvivalent v daném bodě v hloubce 10 mm pod povrchem těla pro silně pronikavé záření
<b><math>H_p(0.07)</math></b>	osobní dávkový ekvivalent v daném bodě v hloubce 0.07 mm pod povrchem těla pro slabě pronikavé záření
<b><math>H_p(3)</math></b>	osobní dávkový ekvivalent v hloubce 3 mm pro ozáření oka
<b><math>H^*(d)</math></b>	prostorový dávkový ekvivalent v hloubce d v kouli ICRU [39]
<b><math>H'(d,\Omega)</math></b>	směrový dávkový ekvivalent v hloubce d v kouli ICRU [39] a směru $\Omega$
<b><math>\Phi_0</math></b>	světelný tok vstupující do vzorku
<b><math>\Phi</math></b>	světelný tok vystupující ze vzorku
<b><math>K_a</math></b>	kerma ve vzduchu
<b><math>OD</math></b>	optická hustota

## Obsah

Úvod.....	9
<b>1. Současný stav.....</b>	<b>12</b>
1.1 <i>Současný stav radiační ochrany.....</i>	12
1.1.1 <i>Základní principy radiační ochrany.....</i>	12
1.1.2 <i>Veličiny radiační ochrany.....</i>	15
1.1.3 <i>Program monitorování.....</i>	16
1.1.4 <i>Osobní monitorování.....</i>	17
1.1.4.1 <i>Osobní monitorování zevního ozáření.....</i>	18
1.1.4.2 <i>Veličiny monitorování zevního ozáření.....</i>	19
1.1.4.3 <i>Stanovení referenčních úrovní pro osobní monitorování.....</i>	21
1.1.5 <i>Osobní dozimetry.....</i>	22
1.1.5.1 <i>Kalibrace osobních dozimetrů a interpretace výsledků monitorování.....</i>	24
1.1.5.2 <i>Umístění osobního dozimetru.....</i>	26
1.1.6 <i>Přehled a vlastnosti osobních dozimetrů použitých v diplomové práci.....</i>	27
1.1.6.1 <i>Filmový dozimetr.....</i>	27
1.1.6.1.1 <i>FD použitý v diplomové práci.....</i>	32
1.1.6.1.2 <i>Elektronický dozimetr.....</i>	36
1.1.6.2.1 <i>ED použitý v diplomové práci.....</i>	38
1.2 <i>Současný stav radiační ochrany v defektoskopii.....</i>	42
1.2.1 <i>Defektoskopie.....</i>	43
1.2.2 <i>Radiační ochrana v defektoskopii.....</i>	43
1.2.3 <i>Typy defektoskopů a typických aplikací.....</i>	44
1.2.4 <i>Osobní monitorování zevního ozáření v defektoskopii.....</i>	47
1.2.4.1 <i>Osobní monitorování zevního ozáření v defektoskopii u fy Kulle Praha....</i>	48
1.2.5 <i>Nejčastější příčiny nepřijatelného ozáření pracovníků defektoskopii.....</i>	49
<b>2. Cíle práce a hypotézy.....</b>	<b>51</b>
<b>3. Metodika.....</b>	<b>52</b>
3.1 <i>FD a ED na defektoskopickém pracovišti.....</i>	52
3.1.1 <i>FD v defektoskopii.....</i>	52
3.1.2 <i>ED DMC 2000 XB v defektoskopii.....</i>	53
3.2 <i>Měření osobních dávek při různých pracovních činnostech.....</i>	58

3.3	<i>Vyhodnocování a statistické zpracování osobních dávek</i> .....	59
3.4	<i>Posouzení výhod a nevýhod FD a ED</i> .....	59
<b>4.</b>	<b>Výsledky</b> .....	60
4.1	<i>Dávková závislost ED</i> .....	60
4.2	<i>Energetická závislost ED</i> .....	64
4.3	<i>Výsledky osobního monitorování defektoskopických pracovníků</i> .....	66
4.3.1	<i>Výsledné hodnoty osobních dávkových ekvivalentů - FD</i> .....	68
4.3.2	<i>Výsledné hodnoty osobních dávkových ekvivalentů - ED</i> .....	71
<b>5.</b>	<b>Diskuze</b> .....	74
5.1	<i>Dávková a energetická závislost ED</i> .....	74
5.2	<i>Odezva ED k různým druhům IZ</i> .....	75
5.3	<i>Porovnání <math>H_p(10)</math> z FD a ED</i> .....	76
5.4	<i>Porovnání <math>H_p(0.07)</math> z FD a ED</i> .....	80
5.5	<i>Porovnání vypočtených E, <math>H_1</math> a S z FD a ED</i> .....	84
5.6	<i>Měření osobních dávek při různých pracovních činnostech se ZIZ</i> .....	86
5.7	<i>Vyhodnocení výhod a nevýhod FD a ED</i> .....	87
<b>6.</b>	<b>Závěr</b> .....	90
<b>7.</b>	<b>Seznam použité literatury</b> .....	92
<b>8.</b>	<b>Klíčová slova</b> .....	96



## Úvod

Ionizující záření a jeho aplikace jsou v dnešní době využívány v mnoha oblastech lidské činnosti, např. v průmyslu, v lékařských aplikacích, výzkumu, apod., a stále přinášejí nové, účinné postupy k řešení celé řady problémů. Na druhé straně při manipulaci s radioaktivními látkami hrozí nebezpečí ozáření osob spojené s možností poškození zdraví.

Cílem radiační ochrany je zabezpečit dostatečnou úroveň ochrany zdraví a ponechat přitom přínos z využití zdrojů záření. Systém radiační ochrany je vystaven na třech hlavních pilířích:

1. zdůvodnění činnosti - žádná praxe nesmí být zavedena, pokud nepovede k pozitivnímu čistému přínosu;
2. optimalizace radiační ochrany - všechna ozáření musí být udržována na tak nízké úrovni, jaké lze s uvážením všech ekonomických a sociálních podmínek dosáhnout;
3. limity ozáření - hodnoty efektivní  $E$  a ekvivalentní dávky  $H_t$  pro jednotlivé orgány a tkáň nesmí u jednotlivce překročit limity stanovené vyhláškou [25].

Základním předpokladem kontroly stanovených limitů radiačních pracovníků pracujících na pracovištích se zdroji ionizujícího záření je kvantitativní znalost radiačního pole a dávek, kterým jsou pracovníci běžně vystaveni při své pracovní činnosti. Důležitým úkolem radiační ochrany je proto monitorování zevního ozáření radiačních pracovníků, interpretace měřených veličin a jejich hodnocení vzhledem k uplatňování opatření, která ozáření omezují či regulují.

K monitorování zevního ozáření radiačních pracovníků se využívají různé druhy dozimetrických systémů, filmový, elektronický, termoluminiscenční, radiofotoluminiscenční. Primárním prostředkem dozimetrické kontroly zevního ozáření radiačních pracovníků v České republice je filmová dozimetrie. Filmový dozimetr má přes celou řadu svých výhod (trvalá hodnota záznamu o dávce, určení druhu a energie záření a směru ozáření, nízká cena) jednu základní nevýhodu a to, že neposkytuje

okamžitou informaci o dávce, kterou obdržel radiační pracovník při své činnosti se zdroji ionizujícího záření.

S vývojem miniaturizace elektroniky a výpočetní techniky a s jejich ekonomickou dostupností nabyly na významu elektronické dozimetry. Elektronické dozimetry jsou kompaktní zařízení, která slouží k okamžité detekci a prezentaci dávek a dávkových příkonů ionizujícího záření. Z počátku byly používány jako operativní dozimetry k vyhodnocování radiační zátěže pracovníků se zdroji ionizujícího záření, v dnešní době začínají nahrazovat dozimetry pasivní v jaderných elektrárnách, defektoskopických pracovištích, diagnostických a radioterapeutických pracovištích v nemocnicích. Elektronické dozimetry kromě svých výhod, mezi něž patří okamžitá informace o dávce a dávkových příkonech, možnost nastavení alarmů pro dávku či dávkový příkon, stanovení radiační zátěže pro jednotlivé činnosti se zdroji ionizujícího záření, mají také nedostatky, jakými jsou např. možnost ovlivnění starších typů elektronických dozimetrů rušivým elektromagnetickým zářením a poměrně vysoká cena.

Cílem předložené diplomové práce je porovnání údajů elektronických dozimetrů DMC 2000 XB společně s dosud používanými filmovými dozimetry na defektoskopickém pracovišti firmy Kulle PK-Q, Na Pokraji 2/540, Praha 9 - Prosek, pořízených při různých pracovních činnostech. Na základě výsledků z osobního monitorování zevního ozáření defektoskopických pracovníků z filmové a elektronické dozimetrie a po stanovení výhod a nevýhod těchto dvou dozimetrických systémů, je doporučen výhodnější dozimetrický systém pro osobní monitorování pracovníků v defektoskopické firmě Kulle.

V kapitole „Současný stav radiační ochrany“ jsou shrnuty zásady radiační ochrany a jejich veličin, programy osobního monitorování zevního ozáření radiačních pracovníků. Dále jsou popsány typy a fyzikální principy osobních dozimetrů, jejich kalibrace a interpretace jejich údajů.

Kapitola „Radiační ochrana v defektoskopii“ je věnována zdrojům ionizujícího záření používaných v defektoskopii a systému monitorování radiační zátěže pracovníků.

Experimentální část diplomové práce je shrnuta v kapitole „Metodika“ a je věnována vlastnímu měření osobních dávek pracovníků defektoskopie u firmy Kulle pomocí elektronických a filmových dozimetrů. V „Diskusi“ jsou porovnány výsledky získané oběma typy dozimetrů a jsou navržena možná vysvětlení rozdílů v indikovaném osobním dávkovém ekvivalentu. Dále jsou zde shrnuty výhody a nevýhody obou dozimetrických systémů.

V „Závěru“ jsou zhodnoceny získané výsledky a je doporučen vhodnější osobní dozimetr pro pracovníky v defektoskopické firmě Kulle.

## 1. Současný stav

### 1.1 Současný stav radiační ochrany

V souladu s obecnými principy ochrany zdraví je cílem radiační ochrany zabezpečit dostatečnou úroveň ochrany zdraví a umožnit přitom přínos z využití zdrojů záření a jaderné energie [1].

#### 1.1.1 Základní principy radiační ochrany

Radiační ochrana vychází ze tří základních principů:

- Odůvodnění radiační činnosti
- Optimalizace radiační ochrany (princip ALARA)
- Limity ozáření

**Odůvodnění radiační činnosti** je definované atomovým zákonem [27]: „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.“

**Optimalizace radiační ochrany** - v rámci optimalizace radiační ochrany musí být všechny činnosti vedoucí k ozáření udržovány a plánovány na co nejnižší rozumně dosažitelné úrovni se zohledněním hospodářských a společenských hledisek [5].

Optimalizace radiační ochrany je někdy nazývána **princip ALARA (as low as reasonably achievable)**. Obsahuje metody a nástroje, s jejichž pomocí lze udržovat

hodnoty všech expozičních tak nízké, jak lze dosáhnout s uvážením souvisejících ekonomických a sociálních podmínek. Optimalizace radiační ochrany se provádí:

- Před zahájením činnosti vedoucí k ozáření posouzením a porovnáním variant řešení radiační ochrany a posouzením nutných nákladů na příslušná ochranná opatření, posouzením kolektivních dávek a dávek u příslušných kritických skupin obyvatel.
- Při vykonání radiační činnosti vedoucí k ozáření pravidelným rozbořem obdržených dávek ve vztahu k prováděným úkonům, uvážením možných dalších opatření k zajištění radiační ochrany a porovnáním s obdobnými již provozovanými a přitom společensky přijatelnými činnostmi.
- Před zahájením zásahu k odvrácení nebo snížení ozáření posouzením možných variant a volbou takové, která svým způsobem provedení, rozsahem a dobou trvání přinese co největší čistý přínos.
- Při uskutečňování zásahu rozbořem obdržených dávek ve vztahu k prováděným opatřením a uvážením změny zvolených opatření a postupů.

Varianty radiační ochrany posuzované v rámci optimalizace radiační ochrany nesmí vést k ozáření, které by převyšovalo limity ozáření nebo optimalizační meze, pokud jsou pro daný případ stanoveny [5].

**Limity ozáření** - každý, kdo provádí činnosti vedoucí k ozáření, musí omezovat ozáření fyzických osob tak, aby nebyly překročeny limity ozáření stanovené legislativou [25].

Limity jsou závazné kvantitativní ukazatele, jejichž překročení není z hlediska radiační ochrany přípustné. Rozlišujeme [25]:

- **limity pro pracovníky se ZIZ** vztahující se na ozáření, kterému jsou vědomě, dobrovolně a po poučení o rizicích s tím spojených vystaveny osoby při výkonu svého povolání
- **limity pro učně a studenty** vztahující se na dobu jejich specializované přípravy na výkon povolání se zdroji ionizujícího záření

- **limity obecné**, které se uplatňují na průměrné ozáření v kritické skupině obyvatel (modelová skupina fyzických osob, která představuje ty jednotlivce z obyvatelstva, kteří jsou z daného zdroje a danou cestou nejvíce vystaveni záření) pro všechny cesty ozáření a ze všech činností.

Hodnoty platných limitů ozáření jsou uvedeny v tabulce 1-1.

Tabulka 1-1: Limity ozáření stanovené v [26] ( $H_p(0.07)$ ) – vztahuje se na průměrnou ekvivalentní dávku v  $1\text{cm}^2$  kůže.  $H_p(10)$  – pro končetiny: ruce od prstů až po předloktí a nohy od chodidel až po kotníky).

Veličina *	ZL pro pracovníky se ZIZ		ZL pro učně a studenty za rok	ZL obecné za rok
	Za 5 za sebou jdoucích roků	Nejvýše za rok		
$\Sigma E + \Sigma E_{50}$	100 mSv	50 mSv	6 mSv	1
$H_p(3)$	-	150 mSv	50 mSv	15
$H_p(0.07)$	-	500 mSv	150 mSv	50
$H_p(10)$	-	500 mSv	150 mSv	-

\*Definice veličin jsou uvedeny v kapitole 1.1.2

Kromě výše uvedených limitů existují ještě **limity odvozené**. Jedná se o pomocné kvantitativní ukazatele vyjádřené v měřitelných veličinách sloužící ve vybraných případech k prokázání, že limity pro radiační pracovníky nebyly překročeny.

**Odvozenými limity pro zevní ozáření jsou:**

1. pro osobní dávkový ekvivalent v hloubce 0.07 mm hodnota 500 mSv za kalendářní rok,
2. pro osobní dávkový ekvivalent v hloubce 10 mm hodnota 20 mSv za kalendářní rok [3].

### **Odvozenými limity pro vnitřní ozáření jsou:**

1. pro příjem radionuklidů požitím součin hodnoty 20 mSv a konverzního faktoru pro příjem radionuklidu požitím radiačním pracovníkem podle [24],
2. pro příjem radionuklidů vdechnutím součin hodnoty 20 mSv a konverzního faktoru pro příjem radionuklidu vdechnutím radiačním pracovníkem podle [26].

Poslední skupinu limitů tvoří **limity autorizované**. Jsou to závazné kvantitativní ukazatele stanovené SÚJB v příslušném povolení [26].

#### **1.1.2 Veličiny radiační ochrany**

Mezi veličiny radiační ochrany patří [25]:

Absorbovaná dávka  $D_t$  – střední absorbovaná dávka v určité tkáni nebo orgánu je

definována jako:  $D_t = \frac{1}{m_t} \int_{m_t} D dm$ , kde  $m_t$  je hmotnost tkáně nebo orgánu  $t$  a  $D$  je dávka

absorbovaná v elementu hmotnosti  $dm$ .

Ekvivalentní dávka  $H_t$  – součet součinů absorbované dávky  $D_{t,r}$  ve tkáni  $t$  působením

záření  $r$  a radiačního váhového faktoru  $w_r$ ;  $H_t = \sum_r (w_r * D_{t,r})$ , kde  $w_r$  závisí na druhu

a energii dopadajícího záření,  $D_{t,r}$  je absorbovaná dávka zprůměrnovaná přes orgán nebo tkáň  $t$  vyvolaná ionizujícím zářením typu  $r$ .

Efektivní dávka  $E$  – součet všech vážených  $H_t$  ve všech orgánech a tkáních lidského

těla;  $E = \sum_t (w_t * H_t)$ , kde  $w_t$  je tkáňový váhový faktor pro orgán nebo tkáň  $t$  a  $H_t$

ekvivalentní dávka v ozářených tkáních nebo orgánech  $t$ .

Kolektivní efektivní, či ekvivalentní dávka  $S$  – součet efektivních, či ekvivalentních dávek všech jednotlivců v určité skupině.

Úvazek efektivní  $E(\tau)$ , či ekvivalentní dávky  $H_t(\tau)$  – je časový integrál příkonu efektivní, či ekvivalentní dávky po dobu  $\tau$  od příjmu radionuklidů ( $\tau = 50$  let od příjmu radionuklidů u dospělého,  $\tau =$  do věku 70 let pro příjem radionuklidů u dětí).

Dávkový ekvivalent  $H$  – součin absorbované dávky  $D$  v uvažovaném bodě tkáně a jakostního činitele  $Q$ ;  $H = D * Q$ , kde  $Q$  charakterizuje různou biologickou účinnost různých druhů záření. Na dávkovém ekvivalentu je založena operační veličina pro praktické měření monitorování osob. Pro monitorování osob je určen **osobní dávkový ekvivalent  $H_p(d)$** , což je dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v měkké tkáni v hloubce  $d$  mm. Pro slabě pronikavé záření je ICRP 60 [36] doporučena hodnota  $d = 0.07$  mm, pro ozáření oka  $d = 3$  mm. Pro silně pronikavé záření se bere hodnota  $d = 10$  mm.

Hodnoty osobních dávkových ekvivalentů pro silně i slabě pronikavé záření mohou být zjištěny z údajů více dozimetrů nebo z jednoho dozimetru s různými filtry (filmový, termoluminiscenční dozimetr), příp. elektronického dozimetru se dvěma nebo více detektory.

### **1.1.3 Program monitorování**

Prokazování optimalizace radiační ochrany, splnění požadavků limitování ozáření osob a zajištění bezpečného provozu na pracovišti se zdroji ionizujícího záření se uskutečňuje pomocí programů monitorování. Monitorováním se rozumí nejen měření dozimetrických veličin a veličin charakterizujících radiační pole, ale také interpretace a vyhodnocení ozáření pracovníků a dalších osob.

Systém osobního monitorování slouží ke sledování osobních dávek a plnění požadavků limitování ozáření osob, prokazování optimalizace radiační ochrany a ke kontrole bezpečnosti pracoviště se zdroji ionizujícího záření.



Program monitorování zahrnuje monitorování jak pro běžný provoz, tak pro předvídatelné odchylky od běžného provozu, radiační nehody a havárie. Monitorovací program obsahuje [5]:

- vymezení veličin, které budou monitorovány,
- postupy a návody pro vyhodnocování výsledků měření,
- hodnoty referenčních úrovní a přehled příslušných opatření při jejich překročení,
- specifikace metod měření,
- specifikace použitých typů měřících přístrojů a pomůcek.

Monitorování se provádí jako:

1. **soustavné** – musí potvrzovat bezpečnost pracovních podmínek na pracovišti se zdroji ionizujícího záření v souladu s požadavky povolení praxe,
2. **pravidelné** – periodicky se opakuje a jeho cílem je také potvrzení, že dané pracovní podmínky zůstávají bezpečné, v souladu s požadavky povolení praxe,
3. **operativní** – provádí se při určité činnosti a jeho cílem je zhodnotit a zajistit přijatelnost této činnosti z hlediska systému limitování a podmínek povolení praxe [1].

#### **1.1.4 Osobní monitorování**

Osobní monitorování slouží k určení osobních dávek sledováním, měřením a hodnocením individuálního zevního a vnitřního ozáření jednotlivých osob pomocí osobních dozimetrů (filmové, termoluminiscenční, radiofotoluminiscenční, elektronické dozimetry). Pro účely monitorování, posuzování a hodnocení ozáření radiačních pracovníků se rozlišují dvě kategorie pracovníků:

- 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,
- kategorie B – jsou ostatní radiační pracovníci [25].

Pracovníci kategorie A musí být vybaveni osobními dozimetry. Legislativa [27] ukládá nutnost u těchto pracovníků zajistit:

- pravidelné výměny dozimetrů a vyhodnocování osobních dozimetrů,
- okamžité výměny a vyhodnocení osobních dozimetrů v případě podezření nebo vzniku radiační nehody,
- seznamování pracovníků s výsledky vyhodnocení dávek z jejich osobních dozimetrů.

Jelikož cílem diplomové práce je monitorování zevního ozáření pracovníků při defektoskopických pracích, bude následující text věnován pouze monitorování zevního ozáření osob.

#### ***1.1.4.1 Osobní monitorování zevního ozáření***

Pokud se radiační pracovník nachází v poli zdroje ionizujícího záření, dochází k jeho zevnímu ozáření. Monitorování zevního ozáření osob se za normálních podmínek měří jednak osobními dozimetry, jednak na základě údajů monitorování pracovního prostředí. U všech pracovníků kategorie A včetně externích pracovníků je nutné zajistit pravidelné měsíční monitorování pomocí osobních dozimetrů. U pracovníků kategorie B není požadováno pravidelné osobní monitorování, ale z důvodu bezpečnosti je vhodné provádět osobní monitorování u těchto pracovníků alespoň jednou za tři měsíce.

Cílem osobního monitorování je stanovit, zda nedošlo k překročení limitů pro radiační pracovníky. K tomu nám slouží tzv. odvozené limity vyjádřené v operačních

dozimetrických veličinách ( $H_p(0.07)$ ,  $H_p(10)$ ). Je proto nezbytné, aby byl osobní dozimetr kalibrovaný v dané veličině, vykazoval požadovanou energetickou a úhlovou závislost v mezích uvedených v [34], a aby údaj dozimetru odpovídal ozáření osoby [5].

Podle [33] existují tři typy ozáření pracovníků příp. jejich kombinací:

- dominantně ve směru hrud' – záda,
- ze zadního prostoru (např. řidič při transportu radioaktivních látek),
- rovinně či sféricky izotropním polem [26].

#### **1.1.4.2 Veličiny monitorování zevního ozáření**

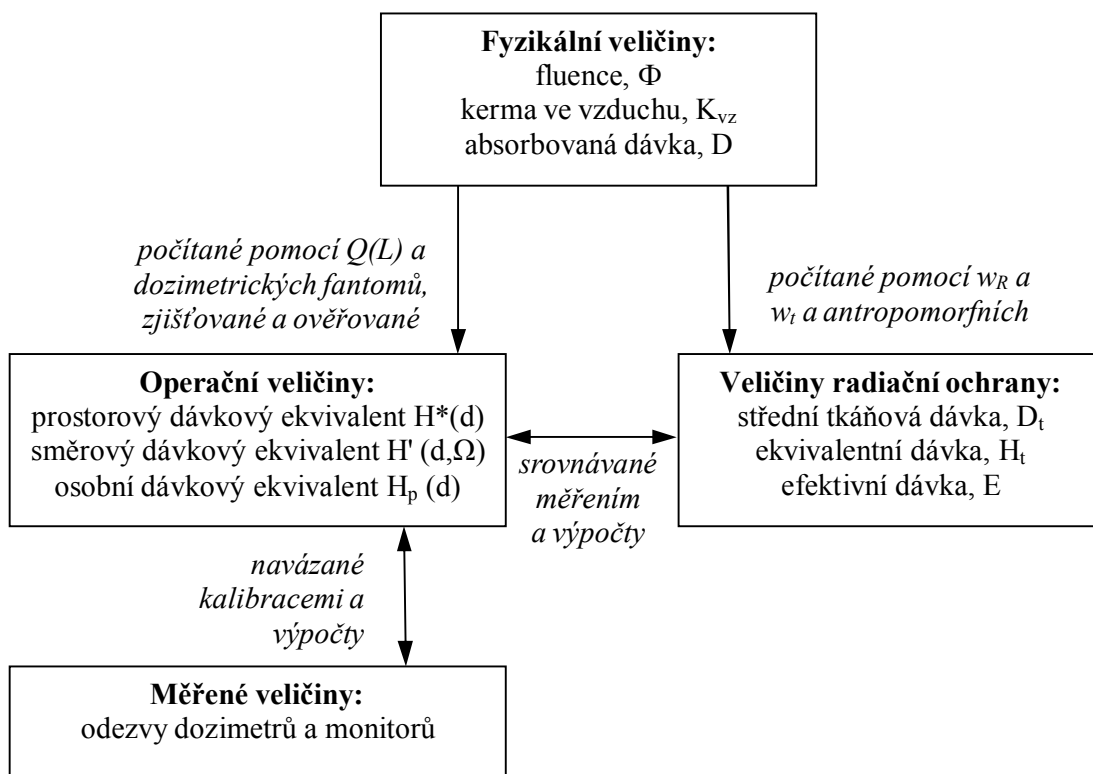
K monitorování zevního ozáření byly zavedeny tři operační, měřitelné veličiny:

- prostorový dávkový ekvivalent  $H^*(\mathbf{d})$  - v daném bodě v poli záření je dán jako dávkový ekvivalent vytvořený odpovídajícím rozšířeným a usměrněným polem v hloubce  $\mathbf{d}$  ( $d = 0.07$  mm pro slabě pronikavé záření a  $d = 10$  mm pro silně pronikavé záření) v kouli ICRU [39] na poloměru mířícím proti směru pohybu částic v usměrněném poli [1];
- směrový dávkový ekvivalent  $H'(\mathbf{d}, \mathbf{\Omega})$  - v daném bodě v poli záření je dávkový ekvivalent vytvořený odpovídajícím rozšířeným polem v hloubce  $\mathbf{d}$  v kouli ICRU [39] na poloměru ve směru  $\mathbf{\Omega}$  [1];
- osobní dávkový ekvivalent  $H_p(\mathbf{d})$  - definice je uvedena v kapitole 1.1.2.

Tyto veličiny byly definovány se záměrem, aby poskytovaly rozumný odhad veličin radiační ochrany –  $D_t$ ,  $H_t$ ,  $E$ , které nejsou přímo měřitelné, ale slouží jako veličiny základních limitů.

Nalézt vztahy mezi oběma skupinami veličin (obrázek č. 1-1) znamená navázat obě skupiny na veličiny fyzikální – fluenci  $\Phi$ , kerma ve vzduchu  $K_a$  a absorbovanou dávku  $D$ . Definice těchto fyzikálních veličin je uvedena v [6].

Vzájemné vztahy a převody těchto veličin jsou uvedené v publikacích [37] a [38]. Jsou prezentovány pro záření gama do energie 10 MeV, pro které je výchozí fyzikální veličinou  $K_a$ , pro neutrony do energie 180 MeV, pro něž je výchozí veličinou fluence  $\Phi$ , a elektrony do 45 MeV, pro něž je výchozí veličinou fluence  $\Phi$  nebo dávka  $D$ .



Obrázek č. 1-1: Vztahy mezi veličinami pro účely monitorování zevního ozáření.

### **1.1.4.3 Stanovení referenčních úrovní pro osobní monitorování**

V programu monitorování se vymezují referenční úrovně. Jsou to hodnoty, jejichž dosažení signalizuje určitou radiační situaci [25]. Referenční úrovně jsou zpravidla odvozené od stanovených limitů pro radiační pracovníky a pro jejich stanovení se jako referenční hodnota uvažuje hodnota 20 mSv/rok.

V programu monitorování se referenční úrovně dělí do tří základních skupin:

- Záznamové úrovně
- Vyšetřovací úrovně
- Zásahové úrovně

#### **Záznamové úrovně**

Záznamové úrovně jsou referenční úrovně, při jejichž překročení je třeba údaj zaznamenávat a evidovat [25]. Záznamová úroveň je závislá na typu použitého dozimetru a schválené metodice používané příslušnou dozimetrickou službou. Záznamová hodnota by měla být na úrovni **1/10 limitů** nebo menší. Pro efektivní dávku E a měsíční kontrolní období je tato hodnota tedy rovna 0,17 mSv a pro  $H_p(0.07)$  rovna 0,42 mSv.

Pro filmový dozimetr a jednoměsíční vyhodnocování je záznamová úroveň pro efektivní dávku E rovna 0,1 mSv a pro osobní dávkový ekvivalent  $H_p(0.07)$  4 mSv. U elektronických dozimetrů jsou zaznamenávány všechny naměřené hodnoty [3].

#### **Vyšetřovací úrovně**

Vyšetřovací úrovně jsou referenční úrovně, jejichž překročení je podnětem k následnému šetření o příčinách a možných důsledcích zjištěného výkyvu sledované veličiny radiační ochrany [25]. Tato úroveň je zpravidla stanovena jako 3/10 limitů, tj. 0,5 mSv pro efektivní dávku při měsíčním kontrolním období. Může být také stanovena jako horní mez obvykle se vyskytujících hodnot na daném pracovišti - což lze především doporučit na pracovištích, kde se dávky po provedeném zdůvodnění

a optimalizaci pohybují rutinně v nějakém konstantním rozmezí vyšším než uvedená hodnota. Pak může vyšetřovací úroveň být i vyšší než vypočtených 0,5 mSv [5].

### **Zásahové úrovně**

Zásahové úrovně jsou referenční úrovně, jejichž překročení je podnětem k zahájení nebo zavedení opatření ke změně zjištěného výkyvu sledované veličiny radiační ochrany [25]. U zásahových úrovní vymezených v programu monitorování se přesně uvádí, o jaký zásah se jedná a jakým postupem se o něm rozhoduje. Zásahové úrovně se zpravidla stanovují na úrovni určeného limitu, tj. **20 mSv**. Tato hodnota je také stanovena legislativou [25] jako hodnota, která je oznamovaná SÚJB spolu s přešetřením příčin a přijatými závěry. Je možné použít tuto hodnotu jako zásahovou úroveň pro monitorovací období i pro roční dávku.

Referenční úrovně mohou být pro sledování hodnot v průběhu roku stanoveny ve veličině osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  a  $H_p(0.07)$ . Teprve při jejich překročení se musí provést přepočítání na efektivní dávku, která je v závislosti na energii a typu záření nižší než  $H_p(10)$ . Stejně tak referenční úrovně pro sledování ročních a pětiletých dávek jsou stanovovány také pro efektivní dávku [25].

Je důležité sledovat celkovou dávku v průběhu roku a reagovat požadovaným způsobem také na případy překročení hodnoty 20 mSv v průběhu roku způsobené sčítáním měřených hodnot. K těmto případům by mělo ovšem docházet pouze výjimečně pokud jsou řádně sledovány a šetřeny všechny případy překročení vyšetřovacích úrovní. Stejně se postupuje v případě stanovení hodnot referenčních úrovní pro ekvivalentní dávku ve stanovených orgánech nebo tkáních [5].

#### **1.1.5 Osobní dozimetry**

V osobním monitorování radiačních pracovníků je důležitý správný výběr osobního dozimetru. Osobní dozimetr musí být uzpůsoben typu a energii záření,

rozsahu dávek, tvaru radiačního pole a způsobu práce se zdrojem ionizujícího záření. Volba dozimetru tedy závisí nejen na druhu záření v daném radiačním poli, ale také na tom, jaká dozimetrická informace je požadována. V praxi jsou nejčastěji používány tyto typy osobních dozimetrů:

- **dozimetry fotonů:** umožňují získat informaci o hodnotě veličiny  $H_p(10)$  v polích záření X a gama,
- **dozimetry záření beta a fotonů:** umožňují získat současně informaci o hodnotách  $H_p(0.07)$  i  $H_p(10)$  v radiačním poli,
- **komplexní dozimetry pracující na diskriminačním principu:** umožňují získat informaci nejen o hodnotách  $H_p(0.07)$  a  $H_p(10)$ , ale i o typu záření, jeho efektivní energii, příp. i orientaci osoby v poli záření,
- **dozimetry neutronů:** dávají informaci o hodnotě  $H_p(10)$  v radiačním poli neutronů,
- **dozimetry extremit:** dávají informaci o úhlové distribuci radiačního pole a o velikosti ozáření dané části těla [5].

Pokud záření gama v radiačních polích tvoří dominantní složku, je postačující měřit veličinu  $H_p(10)$  pomocí jednoduchého osobního dozimetru.

Jestliže radiační pole obsahuje významný podíl slabě pronikavého záření (záření beta, elektrony o energii nižší než 2 MeV a fotony o energii nižší než 30 keV), je nutné, aby osobní dozimetr měřil i dávkový ekvivalent  $H_p(0.07)$  v hloubce 0,07 mm pod povrchem těla, jelikož hodnota  $H_p(0.07)$  v tomto případě může být vyšší než hodnota  $H_p(10)$ . K tomuto účelu je vhodné použít filmový dozimetr s vhodnou sestavou absorpčních filtrů, případně vícesložkový TLD.

Zvláštní pozornost z hlediska osobní dozimetrie představují směsná pole záření gama a neutronů. Pokud je podíl neutronové složky dávky vyšší než složky záření gama, musí být radiační pracovník vybaven kromě osobního dozimetru záření gama, také osobním neutronovým dozimetrem (vícesložkový albedo dozimetr, dozimetr na bázi detektorů stop) [5].

### ***1.1.5.1 Kalibrace osobních dozimetrů a interpretace výsledků monitorování***

Interpretace výsledků v osobní dozimetrii spočívá v převedení přímo měřených veličin na veličiny, ve kterých jsou stanoveny limity ozáření, tj. ekvivalentní dávka  $H_t$  a efektivní dávka  $E$ . Velikost chyb bude záviset na přesnosti a správnosti s jakou je dozimetr schopen stanovit dozimetrickou veličinu, v níž je kalibrován, a jak správný bude postup interpretace měřené veličiny na námi požadovanou veličinu ( $H_t$ ,  $E$ ) [1].

Kromě monitorování ozáření osob je cílem osobní dozimetrie také vytvořit ideální dozimetr, který bude:

- správně měřit požadovanou dozimetrickou veličinu pro všechny druhy záření,
- určovat geometrii ozáření osoby v daném radiačním poli,
- mít odezvu stabilní v čase,
- necitlivý k jiným fyzikálním a chemickým vlivům (teplota, vlhkost, elektromagnetické pole),
- mít vhodné technické parametry (snadné vyhodnocení odezvy, rozměry, hmotnost, mechanická odolnost)
- ekonomické parametry.

Takový ideální dozimetr, který by splňoval všechny výše uvedené požadavky, v současnosti není k dispozici. Proto je nezbytné pro určitou aplikaci nalézt optimální částečné splnění výše uvedených požadavků [1].

#### **Energetická závislost**

Velké úsilí bylo věnováno v osobní dozimetrii vývoji osobního dozimetru, který by byl schopen stanovit danou dozimetrickou veličinu energeticky nezávisle, tzn. správně a dostatečně přesně odhadnout ozáření osoby bez ohledu na to, v jakém, z hlediska energetické distribuce, radiačním poli byla ozářena. I když se podařilo vyvinout sofistikované systémy, splňující alespoň částečně tento požadavek, setkala se tato možnost brzy s řadou omezení:



- každá dozimetrická veličina má jinou závislost na energii daného typu ionizujícího záření,
- optimalizace dozimetru z hlediska energetické závislosti velmi často zhoršila jeho vlastnosti s ohledem na úhlovou distribuci radiačního pole.

Proto se jako vhodnější ukázalo naopak použití detektorů s výraznou energetickou závislostí. Kombinací těchto detektorů a vhodné výpočetní metody lze vytvořit vícesložkový dozimetr, kterým lze ocenit libovolnou dozimetrickou veličinu při zachování technického řešení dozimetru pouze změnou matematické metody vyhodnocení odezvy jednotlivých komponent dozimetru (poměry odezev, jejich lineární kombinace, metody založené na pravděpodobnostních odhadech, apod.) [1].

### **Radiační pole**

V závislosti na cíli, k němuž osobní dozimetr má být použit, se volí jedna z dále uvedených alternativ:

- pro "čistá" fotonová pole, či v případech, kdy jde o potvrzení, že v dominantní složce radiačního pole nedošlo k významné kvantitativní změně, je vhodné použít jednoduché, "energeticky nezávislé", tzn. vhodně energeticky kompenzované dozimetry např. TLD,
- ve složitých, či z hlediska rizika ozáření osob významných radiačních polích jsou preferovány komplexní, vícesložkové dozimetry [5].

### **Kalibrace**

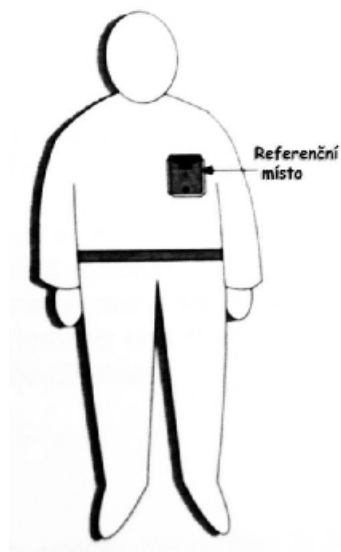
Pro zajištění správnosti a přesnosti hodnocení odezvy osobního dozimetru je nutné mít správně zkalibrovaný dozimetr. Pomocí souboru referenčních, kalibračních polí a technických prostředků [41], [42] a [43] lze provést kalibraci osobního dozimetru a zároveň otestovat jeho:

- linearitu a rozsah odezvy,
- závislost odezvy na úhlové distribuci radiačního pole,
- závislost odezvy k různým druhům záření,
- citlivost k různým fyzikálním a chemickým vlivům,

- stabilitu odezvy v čase.

#### 1.1.5.2 Umístění osobního dozimetru

Radiační pracovníci musí nosit osobní dozimetr zásadně na **referenčním místě**, tj. na levé horní části hrudníku na oděvu [5], (obrázek č. 1-2).



Obrázek č. 1-2: Referenční místo pro osobní dozimetr.

Uvedená poloha dozimetru je mezinárodně přijatá jako charakteristická pro celotělové (přijatelně rovnoměrné) ozáření těla. V případě, že pracovník používá ochrannou zástěru (rentgenologové), nosí se dozimetr vně zástěry, opět na referenčním místě. Má-li pracovník ve stejném okamžiku více dozimetrů daného typu (nerovnoměrné ozáření radiačního pracovníka při práci se zdrojem ionizujícího záření), další, tzv. vedlejší dozimetr se nosí na místě, o němž se předpokládá, že je nejvíce ozařováno [18].

### **1.1.6 Přehled a vlastnosti osobních dozimetrů použitých v diplomové práci**

Následující text bude věnován výhradně filmovým a elektronickým osobním dozimetrům, kterými jsou vybaveni pracovníci kategorie A, případně pracovníci kategorie B. Budou zde popsány základní charakteristiky a fyzikální principy těchto dvou dozimetrických systémů, jejich kalibrace a interpretace údajů.

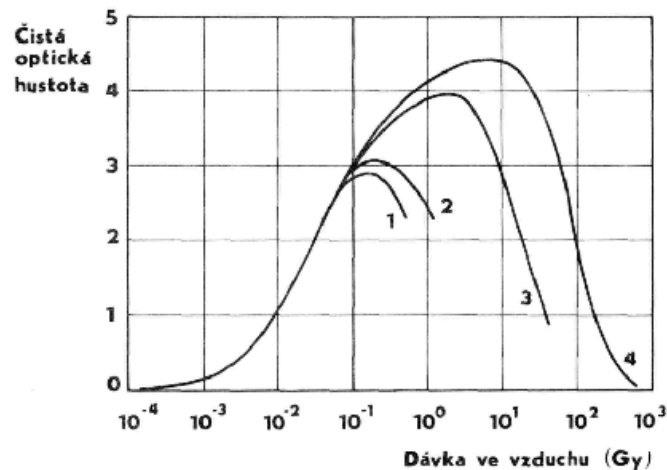
#### **1.1.6.1 Filmový dozimetr**

Filmový dozimetr se používá převážně pro detekci a dozimetrii záření gama a rentgenového záření, elektronového záření a tepelných neutronů. Princip metody je analogický fotografování viditelným světlem - působením ionizujícího záření vzniká latentní obraz, který lze vyvoláním fotografického materiálu zviditelnit a vzniklé zčernání (změna optické hustoty) je mírou ozáření filmu. Tento jednoduchý princip je však zkomplikován mnoha různými faktory, takže přechod od kvalitativního údaje k vlastnímu určení sledované dozimetrické veličiny (dávka, kerma, expozice) předpokládá uvážení všech vlivů, které přesnost a spolehlivost výsledného údaje ovlivňují [6].

#### **Princip fotografického procesu**

Fotografická emulze je tvořena malými krystalky bromidu nebo chloridu stříbrného, obvykle s několika procenty jodidu stříbrného, suspendovanými v želatině (obvyklé rozměry zrn jsou 0,1 – 1  $\mu\text{m}$ ). Nejdůležitější charakteristikou fotografické emulze je změna propustnosti emulze vzhledem k světelnému záření, ke které dochází po jejím ozáření a vyvolání, v závislosti na velikosti expozice. Mírou ozáření je optická hustota OD, definovaná jako logaritmus poměru světelného toku vstupujícího do vzorku ( $\Phi_0$ ) a světelného toku ze vzorku vystupujícího ( $\Phi$ ).

V závislosti na logaritmu expozice je výsledná křivka nazývána charakteristickou křivkou znázorněnou na obrázku č. 1-3.



Obrázek č. 1-3: Charakteristické křivky filmu DuPont 502 exponovaném rentgenovým zářením (50 keV). Křivky: **1** - dávkový příkon ve vzduchu 0,11 mGy/s; **2** - dávkový příkon ve vzduchu 0,33 mGy/s; **3** - dávkový příkon ve vzduchu 131 mGy/s; **4** - dávkový příkon ve vzduchu 11 Gy/s.

Z obrázku č. 1-3 je zřejmé, že zčernání vzniklé ve vyvolané emulzi závisí v poměrně širokém rozsahu dávkových příkonů jen na celkové dávce. O této skutečnosti se hovoří jako o recipročním zákonu. Tento zákon neplatí pro ozáření viditelným světlem ani ionizujícím zářením bez omezení. Při extrémně nízkých nebo vysokých dávkových příkonech se citlivost emulze snižuje – vzniklá optická hustota je menší, než by měla být při jeho absolutní platnosti. V oblasti vysokých dávkových příkonů lze tento jev vysvětlit zvýšením pravděpodobnosti rekombinace elektron-díra. U nízkých dávkových příkonů je jev dán skutečností, že je ke vzniku zárodku, který opakovaním cyklu přeroste na centrum latentního obrazu, zapotřebí více než jedno předané kvantum energie [6].

### **Měření účinků ionizujícího záření na dozimetrický film**

Optická hustota se měří denzitometry, buď porovnáváním optické hustoty filmu a šedého srovnávacího klínu, nebo přímo elektronickou cestou. V praxi jsou nejčastěji užívány přímo ukazující denzitometry, kdy se provádí srovnání se standardem: film ozářený neznámou dávkou se porovnává s filmy ozářenými známými hodnotami dávky. Běžné denzitometry měří optické hustoty v rozsahu od 0 do 3 [6].

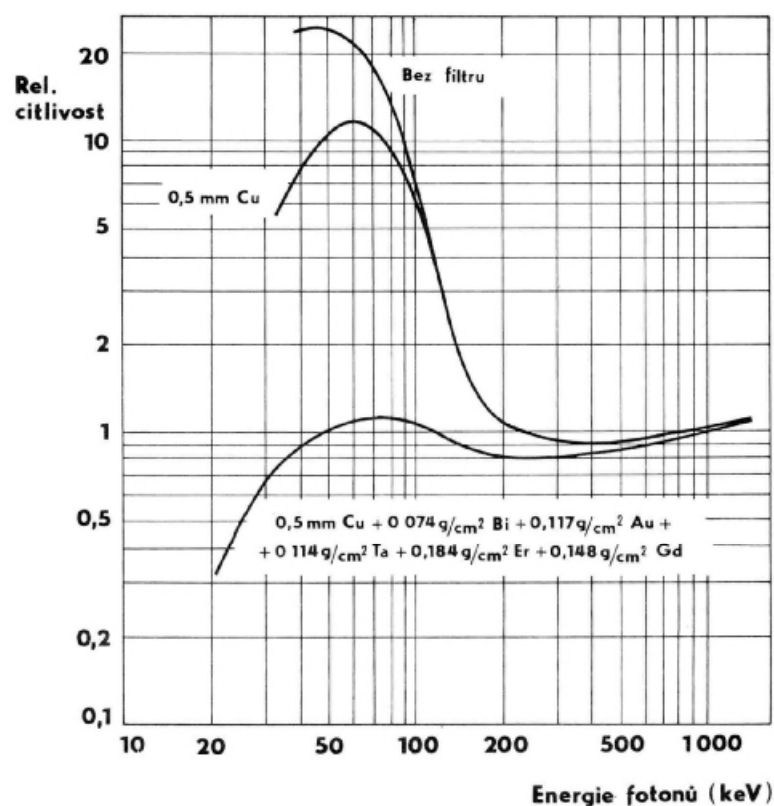
### **Odezva FD na záření gama a rentgenové záření**

Fotografický účinek rentgenového záření závisí na energii záření. Tato energetická závislost je způsobena velkou koncentrací atomů s vysokým protonovým číslem (AgBr) v citlivé vrstvě [2].

Stupeň energetické závislosti dozimetrických filmů se vyjadřuje tzv. faktorem tvrdosti, což je poměr maximální a minimální citlivosti filmu. Experimentálně se stanovuje jako poměr dávek nutných k vytvoření stejné optické hustoty u záření gama  $^{60}\text{Co}$  a rentgenového záření s energií 40 keV. V energetickém rozsahu, který nás nejvíce zajímá, tj. mezi 10 keV až 3 MeV, jsou dosahy elektronů uvolněných při absorpci fotonů souměřitelné s rozměry zrn. Proto elektrony uvolněné mimo zrno v různé míře přispívají k fotografickému procesu, zatímco elektrony uvolněné blízko povrchu zrn AgBr mohou být absorbovány v okolních materiálech a fotografický proces neovlivní. Navíc se zrno ve fotografické emulzi chová jako „prahový detektor“. K tomu, aby se stalo vyvolatelným, vyžaduje určité množství energie. Problém kvantifikace vztahu mezi absorbovanou dávkou a optickou hustotou musí zahrnout takové faktory jako je velikost zrn a rozložení citlivosti, rozptyl elektronů, atd. Tento problém není dosud zcela dořešen, energetická závislost různých fotografických materiálů se stanovuje experimentálně [6], [2].

K částečné eliminaci vlivu energetické závislosti se používá dvou postupů. První z nich usiluje potlačit energetickou závislost vhodnou filtrací záření dopadajícího na film, druhý naopak vychází z energeticky závislého měření a snaží se o odhad energie měřeného záření.

Filtr, kterým prochází fotonové záření na citlivou vrstvu filmu, absorbuje záření nižších energií výrazněji a tak snižuje jeho účinek na film. Sekundární elektrony uvolněné ve filtru mohou naopak zesílit účinek v oblasti vyšších energií. K takové kompenzaci energetické závislosti se používá kovových fólií, nejčastěji olověných, cínových či měděných. Vyrovnání energetické závislosti však lze dosáhnout pouze v omezeném rozsahu energií. K rozšíření tohoto rozsahu se používají kombinace několika filtračních materiálů s přesně definovanou tloušťkou (obrázek č. 1-4).



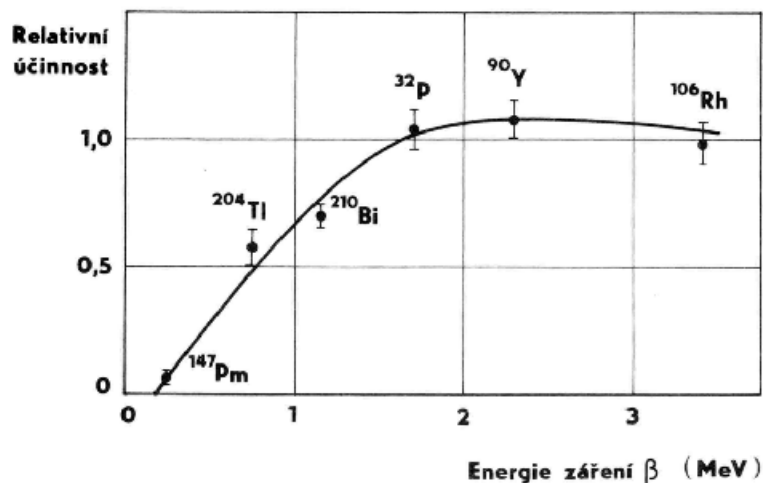
Obrázek č. 1-4: Energetická závislost filmu DuPont 502 bez filtru, s filtrací 0,5 mm Cu a s optimalizovaným šestiprvkovým filtrem [6].

Druhý postup k potlačení energetické závislosti filmů se nazývá metoda filtrační analýzy a využívá změny lineárního součinitele zeslabení v určitém filtračním materiálu

v závislosti na energii záření. Používají se filtry ze stejného materiálu, tj. se stejným protonovým číslem a se stejnou závislostí součinitele zeslabení na energii záření, ale s různou tloušťkou. Při vhodně zvolených tloušťkách je možné z optických hustot filmu za jednotlivými filtry stanovit energii záření, které na film působilo. Známe-li pak energetickou závislost zčernání optické hustoty filmu, je možné určit součinitel, kterým lze opravit hodnotu odečtenou pod nefiltrovaným polem na filmu, aby se dostala skutečná hodnota dávky. Vzhledem k omezenému počtu filtrů, které lze umístit do pouzdra s dozimetrem, obrázek č. 1-9, je možné i tuto metodu použít v omezeném rozsahu energií. Metodu filtrační analýzy používají různé dozimetrické služby v energetickém rozsahu zhruba od 10 keV do 3 MeV [6].

#### Odezva FD na další druhy záření

Podobně jako pro fotonové záření, je dozimetrický film energeticky závislý i při ozáření elektrony o různých energiích. Relativní účinnost je vyjádřena jako poměr dávky odečtené pod prázdným polem a dávky změřené extrapolační komorou. Závislost relativní účinnosti na energii záření beta je znázorněna na obrázku č. 1-5.



Obrázek č. 1-5: Závislost relativní účinnosti filmu ORWO RD 3 na energii záření beta [6].

Dolní hranice energetického rozsahu, v níž lze filmy použít, je dána plošnou hmotností papírového obalu, ve kterém je umístěn dozimetrický film (např. u filmu ORWO je  $20 \text{ mg/cm}^2$ ). U vyšších dávek, kdy se měří optické hustoty havarijního filmu, je energetický rozsah ještě omezen tím, že záření beta musí procházet vysoce citlivým filmem (př. u filmu ORWO je  $35 \text{ mg/cm}^2$ ). Za předpokladu, že dozimetrický film byl ozářen zepředu, lze pomocí filmů měřit dávky záření beta od 0,4 MeV a havarijní dávky (vyšší než 100 mGy) pro energie záření beta vyšší než 0,7 MeV. Dávky záření beta s nižšími energiemi lze detekovat jen s nízkou přesností, jelikož účinnost filmu značně závisí na úhlu dopadu záření.

Korekci energetické závislosti u záření beta lze provádět podobně jako u záření gama a rentgenového záření pomocí filtrační analýzy. Nejvhodnějším materiálem filtrů pro účely dozimetrie záření beta jsou plastické hmoty, jelikož mají nízké protonové číslo a umožňují rozlišit příspěvek od záření beta a fotonů nízkých energií [2].

Pro detekci tepelných neutronů jsou filmové kazety speciálně vybaveny kadmiovými a cínovými filtry. Cd má mimořádně vysoký účinný průřez pro radiační záchyt tepelných neutronů a vznikající záření gama způsobuje měřitelné zčernání. Sn má protonové číslo blízké protonovému číslu Cd, takže při stejné plošné hmotnosti stejně absorbuje záření gama, ale má nízký účinný průřez radiačního záchytu tepelných neutronů. Z rozdílu zčernání pod Cd a Sn filtrem se určuje dávkový ekvivalent tepelných neutronů, ze zčernání pod cínovým filtrem záření gama [4].

#### ***1.1.6.1.1 FD použitý v diplomové práci***

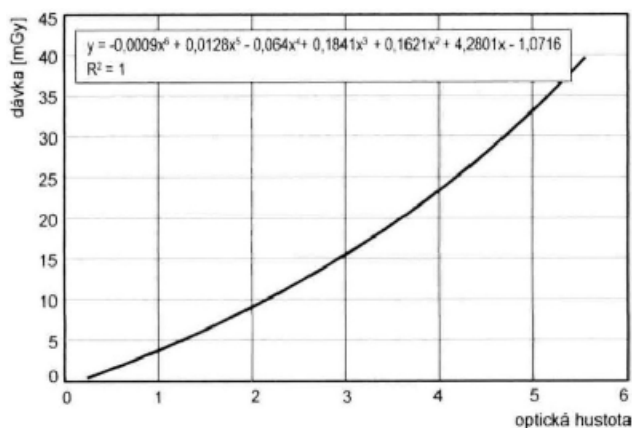
Pro monitorování osobních dávek radiačních pracovníků v ČR se používají filmové dozimetry dodávané a vyhodnocované dozimetrickou službou CSOD. Jedná se o dozimetrický film Foma Personal Monitoring Film (Foma PMF), který je umístěn v dozimetrické kazetě vyráběné a dodávané CSOD. Foma PMF je komplet dvou filmů určených pro osobní dozimetrii záření gama, rentgenového záření a elektronů.



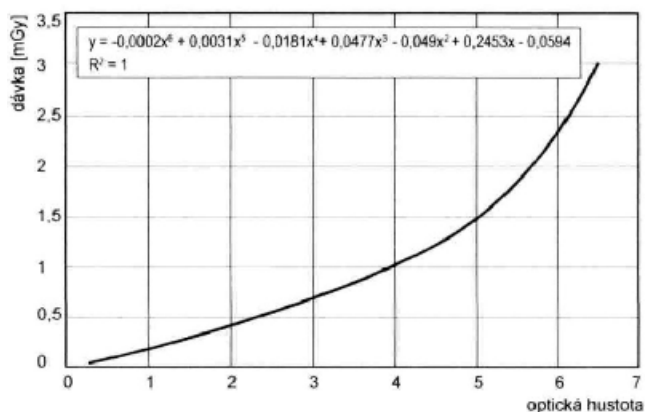
## Kalibrace FD

Pro stanovení dávkové a energetické závislosti je filmový dozimetr kalibrován v polích, pro něž je známa energie záření a dávkový příkon. Tento referenční dozimetr je vyhodnocován současně s dozimetry, u kterých je potřeba stanovit neznámou dávku. Na obrázku č. 1-6 je uvedena kalibrační křivka pro filmy DF 10 (vysoce citlivý film) a pro záření gama  $^{137}\text{Cs}$  při optimálním zpracování provedeném v CSOD. Nejnižší měřitelná dávka je 0,08 mSv ( $\pm 30\%$ ) a od hodnot cca 0,2 mSv je nejistota měření lepší než  $\pm 15\%$ . Doporučení uvedená v [33] a [34] jsou splněna s velkou rezervou (nejistota  $-33\%$  až  $+50\%$  v oblasti ročního limitu dávek).

Na obrázku č. 1-7 je uvedena odpovídající závislost pro rentgenové záření s efektivní energií 49 keV (cca 70 kV + 0,5 mm Cu).

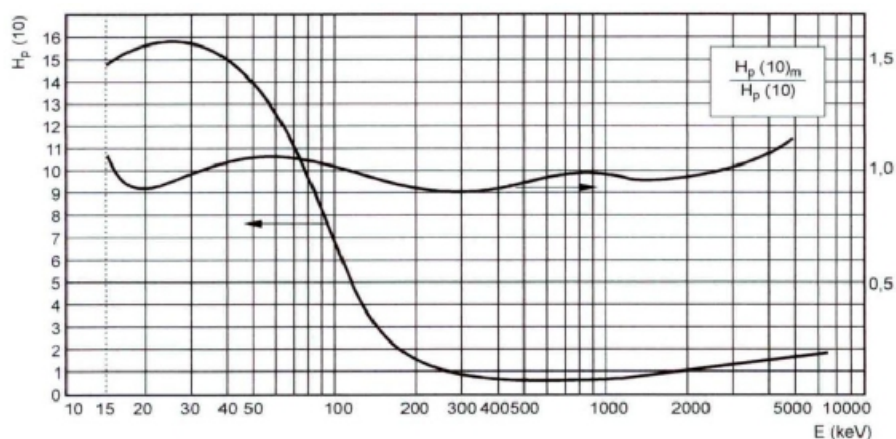


Obrázek č. 1-6: Závislost optické hustoty na dávce záření gama pro film Foma PMF DF 10 [20].



Obrázek č. 1-7: Závislost optické hustoty na dávce rentgenového záření (49 keV) pro film Foma PMF DF 10 [20].

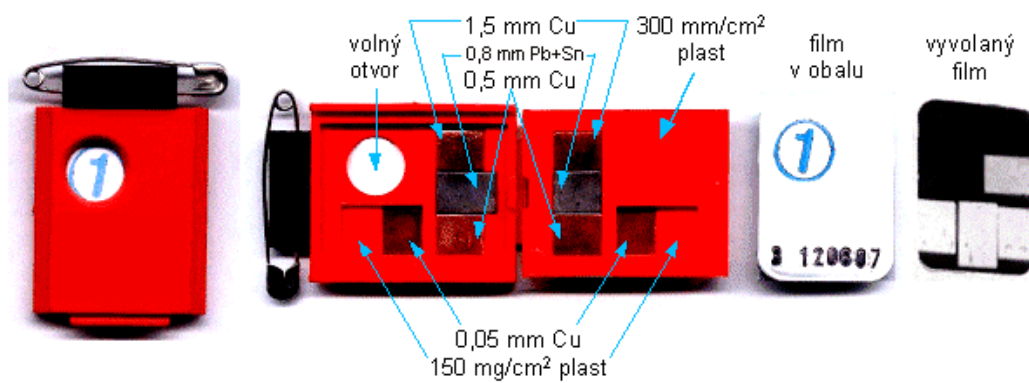
Vlivem energetické závislosti filmů, která je pro filmy Foma uvedena na obrázku č. 1-7, je pro rentgenové záření s energií 49 keV (cca 70 kV + 0,5 mm Cu) citlivost filmu DF10 cca 17x vyšší, jak je zřejmé i z porovnání obrázků č. 1-6 a 1-7. Z těchto důvodů je u filmové dozimetrie nezbytně nutné provádět kompenzaci energetické závislosti některou z metod publikovanou v [20]. Například metoda filtrační analýzy poskytuje v celém energetickém rozsahu 15 keV – 6 MeV velmi dobré výsledky, jak je také uvedeno na obrázku č. 1-8 [20].



Obrázek č. 1-8: Energetická závislost filmů FOMA PMF DF 10 a výsledky její kompenzace metodou filtrační analýzy (měřeno v CSOD, Praha) [20].

### Složení FD

Filmový dozimetr, jak je znázorněno na obrázku č. 1-9, se skládá z dozimetrické kazety s kompenzačními filtry a dozimetrického filmu. Dozimetrický film je oboustranně překryt sadou filtrů (filtry z Cu, Pb, Sn) o různých tloušťkách (od 0,05 do 1,5 mm), které pohlcují záření v závislosti na jeho energii. Tyto filtry slouží jednak ke korekci závislosti míry zčernání na energii záření, jednak porovnáním míry zčernání pod jednotlivými filtry lze odhadnout druh a energii záření [21].



Obrázek č. 1-9: Filmový dozimetr používaný pro osobní monitorování radiačních pracovníků.

Filmový dozimetr nosí radiační pracovníci na referenčním místě a pravidelně 1x za měsíc, případně 1x za 3 měsíce je dozimetr vyhodnocován. S použitím vhodného kalibračního faktoru je výsledkem konzervativní odhad efektivní dávky E.

### Technické parametry filmového dozimetru [18]

Dozimetrický film: Foma Personal Monitoring Film

Dozimetrická kazeta: filmová kazeta CSOD

Měřené veličiny:

- osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$
- osobní dávkový ekvivalent  $H_p(0.07)$

- z veličiny  $H_p(10)$  a stanovené energie záření se počítá efektivní dávka  $E$  podle [37]
- veličina  $H_p(0.07)$  udává konzervativní odhad ekvivalentní dávky  $H_t$

Rozsah: 0,05 mSv – 2,0 Sv

Nejistota:

- $\pm 25\%$  (v rozsahu 0,3 mSv – 2,0 Sv)
- pod 0,3 mSv nejistota vzrůstá
- u 0,1 mSv nepřevyšší  $\pm 50\%$

Příkon dávkového ekvivalentu: bezomezení

Rozsah energií záření:

- 10 keV – 15 MeV pro fotonové záření (rentgenové záření a záření gama)
- 0,5 MeV – 15 MeV pro elektrony
- tepelné neutrony (měření vyžaduje použití upravených kazet)

Rozsah pracovních teplot: 0 až 45 °C (film nesmí zmrznout – nutno zajistit při práci venku v zimě)

Přípustné pracovní prostředí: škodí organická rozpouštědla

### **1.1.6.2 Elektronický dozimetr**

S vývojem miniaturizace elektroniky a výpočetní techniky a s jejich ekonomickou dostupností nabyly na významu elektronické osobní dozimetry. Zpravidla pracují na bázi křemíkových (Si) diod, které jsou schopné detekovat fotony o energii vyšší než 30 keV. Elektronické dozimetry se třemi Si diodami, z nichž každá má jinou energetickou závislost, umožňují současné měření několika dozimetrických veličin –  $H_p(10)$ ,  $H_p(0.07)$ , a to odděleně pro záření gama a beta (s energií vyšší než 250 keV) [10].



Obrázek č. 1-10: Elektronický osobní dozimetr DMC 2000 XB, vyráběný firmou MGP Instruments SA (*1 – střed detektoru, 2 – vstupní okénko pro detekci záření beta, 3 – funkční tlačítko, 4 – kryt baterie*).

Elektronické dozimetry (obrázek č. 1-10), jsou kompaktní zařízení, která slouží k detekci ionizujícího záření a prezentaci dávek a dávkových příkonů ionizujícího záření. Z počátku se používaly jako operativní dozimetry k vyhodnocování radiační zátěže osob pohybujících se v kontrolovaném pásmu zejména v jaderných elektrárnách. V poslední době se jejich použití rozšiřuje i do jiných oblastí a začínají se používat dozimetrickými službami i jako legální dozimetry – tzn. autorizované pro hodnocení ozáření osob [10].

Při spojení elektronického dozimetru s kódovanou kartou a s počítačovým vyhodnocením odezvy dozimetru lze stanovit nejen dávku, kterou osoba obdržela v daném časovém intervalu, ale i v kterém pracovním místě, příp. při jaké pracovní činnosti. Systém dovoluje i celostátní automatizovanou registraci dávek a jejich hodnocení. Vývoj těchto dozimetrů pokračuje a určitě bude i nadále pokračovat tak, aby byla postupně odstraněna všechna závažnější omezení jejich použití jako legálních

dozimetrů v praxi (např. vliv vysokofrekvenčních elektromagnetických polí na odezvu dozimetru). Tento trend je již nyní velmi zřetelný např. ve Velké Británii a Francii [12].

### **Požadovaná přesnost měření**

Dokumenty [33] a [34] požadují, aby nejistota stanovení veličiny E, resp.  $H_t$  byla v rozpětí  $-33\%$  až  $+50\%$  (95 % interval spolehlivosti) pro hodnoty na úrovni ročních limitů. V oblasti záznamové úrovně se připouští nejistota  $\pm 100\%$ .

ČMI-IIZ při ověřování požaduje podle [34] splnění uvedených požadavků pro 19 z 20 měření. Nejistoty stanovení veličiny  $H_p(10)$  jsou většinou přísně stanoveny zejména pro oblast vyšetřovací a zásahové úrovně (do  $\pm 25\%$ ). Přesnost měření osobních dávkových ekvivalentů schválenou dozimetrickou službou je ověřována v souladu s metrologickým zákonem [28] jednou za 2 roky.

#### ***1.1.6.2.1 ED použitý v diplomové práci***

Elektronický dozimetr DMC 2000 vyrábí francouzská firma MGP Instruments SA [13] a to ve třech verzích: verze DMC 2000 S, X a XB (obrázek č. 1-11).



Obrázek č. 1-11: Elektronický dozimetr DMC 2000 a) verze S, b) verze X, c) verze XB.

V diplomové práci pro stanovení dávek u defektoskopických pracovníků byl použit výše jmenovaný elektronický dozimetr a to verze XB, která se od verzí S a X liší rozšířenou funkcí displeje vztaženou k sekundárnímu měření [17]. Tento elektronický dozimetr pracuje ve dvou režimech, v režimu PAUSE (klidový režim dozimetru s minimální spotřebou) a v aktivním měřicím režimu.

### **Kalibrace ED**

Elektronický osobní dozimetr je kalibrován tak, aby veličina osobní dávkový ekvivalent  $H_p(d)$  interpretovaná z naměřeného údaje osobního dozimetru odpovídala co nejlépe veličině, v níž jsou stanoveny základní limity ( $E$ ,  $H_I$ ).

Kalibrace osobního dozimetru pro záření gama (pro jiné druhy záření je postup analogický, liší se pouze veličinou charakterizující radiační pole, viz. kapitola 1.1.4.2) se provádí následujícím způsobem. Do místa referenčního pole, v němž je známa kerma ve vzduchu, je vložen osobní dozimetr umístěný na fantomu (mezinárodně doporučený je podle [40] vodní fantom ISO, popř. tkániekvivalentní kvádr PMMA o rozměrech  $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ ) a dozimetr je ozářen známou hodnotou kermy ve vzduchu. Změří se odezva dozimetru  $R(E, \alpha)$ . Postup se opakuje pro různé energie záření a pro různou

orientaci fantomu v kalibračním poli, tj. pro různé úhly  $\alpha$ . Pomocí hodnot odezev  $R(E, \alpha)$  se stanoví funkce  $F(E, \alpha)$  [1]:

$$F(E, \alpha) = R(E, \alpha) / K_a(E, \alpha),$$

kde  $K_a(E, \alpha)$  je kerma ve vzduchu. Funkce  $F(E, \alpha)$  se porovná s  $D(E, \alpha)$  [1]:

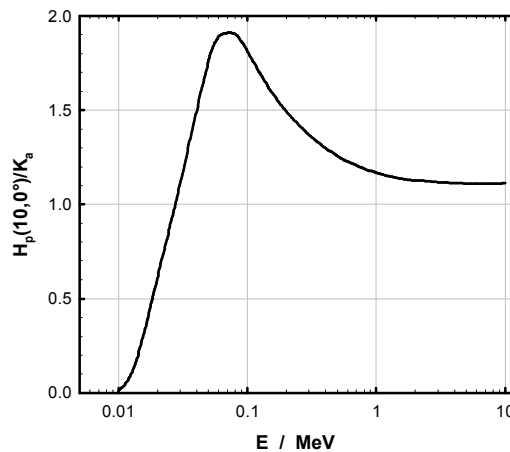
$$G(E, \alpha) = D(E, \alpha) / K_a(E, \alpha),$$

kde  $D(E, \alpha)$  je energetická a úhlová závislost příslušné dozimetrické veličiny např.  $H_p(10, E, \alpha)$ ,  $H_p(0.07, E, \alpha)$ , která byla pro daný typ fantomu vypočtena. Funkce jsou tabelovány v mezinárodním doporučení [40].

Porovnáním funkcí  $F(E, \alpha)$  a  $G(E, \alpha)$  je stanovena kalibrační funkce  $C(E, \alpha)$  osobního elektronického dozimetru [1]:

$$C(E, \alpha) = R(E, \alpha) / D(E, \alpha).$$

Na obrázku č. 1-12 je průběh konverzní funkce kermy ve vzduchu fotonového záření na osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$ .



Obrázek č. 1-12: Konverzní funkce kermy ve vzduchu fotonů  $K_a$  na osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  [38].



## **Technické parametry ED DMC 2000 XB [13]**

### **Radiační charakteristiky**

Druh měření: gama, X a beta

Referenční norma: [34]

Měřená veličina:  $H_p(10)$  a  $H_p(0.07)$

Energetický rozsah:

- 20 keV – 6 MeV pro rentgenové záření a záření gama
- od  $E_{ef} = 60$  keV pro záření beta

Energetická závislost:  $H_p(10)$

- rentgenové záření a záření gama:  $\leq \pm 30$  % od 20 keV – 1,3 MeV
- záření beta:  $\leq \pm 20$  % – 6 MeV

Energetická závislost:  $H_p(0.07)$

- rentgenové záření a gama záření:  $\leq \pm 20$  % od 20 keV – 1.3 MeV
- záření beta:  $\leq \pm 30$  % od  $E_{ef} > 60$  keV

### **Elektronické charakteristiky:**

Napájení: baterie  $\text{LiMnO}_2$

Ochrana proti elektromagnetickému rušení: vyhovuje normám [31], [32] a test do 40 GHz při 10 V/m.

### **Funkční charakteristiky:**

Alarmy:

- zvukový: 80 dBA – 30 cm
- optický: červená LED a blikající displej

Prahy alarmů:

- alarm dávky
- alarm dávkového příkonu

Zabezpečení a kontroly:

- funkce „srdečního tlukotu“: blikání 2 indikátorů životnosti
- autotest včetně detektoru
- test baterie
- životnost baterie: zobrazení zbývající doby

- alarm po vyjmutí baterie

Paměť:

- časový záznam historie: 700 zaznamenaných kroků
- interval ukládání: 10 s, 1 min, 10 min, 1 h, 24 h
- různé události: závady, alarmy, změny stavů

**Mechanické charakteristiky:**

Pouzdro: vysoce odolné PVC

Rozměry: 86,5 x 48 x 18,5 mm<sup>3</sup>

Odolnost vůči vodě: ponoření do vody (1 m)

Mechanická odolnost:

- pády – 1,5 m
- vibrace – 2 g 10 Hz – 33 Hz, 15 min.

Kromě výše uvedených osobních dozimetrů se v praxi používají pro měření osobních dávek radiačních pracovníků také termoluminiscenční a neutronové osobní dozimetry. Charakteristiky, přednosti a technické parametry těchto dvou složek dozimetrických systému jsou uvedeny např. v [6] a [2].

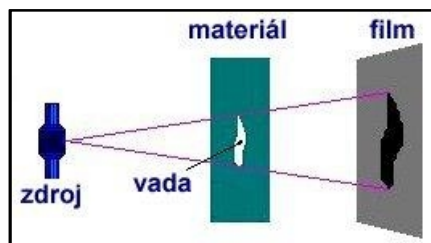
## ***1.2 Současný stav radiační ochrany v defektoskopii***

Tato kapitola je věnována defektoskopii, radiační ochraně a specifickým požadavkům na osobní dozimetrii radiačních pracovníků defektoskopie.

### 1.2.1 Defektoskopie

Defektoskopie je nedestruktivní metoda, pomocí které se kontrolují různé vlastnosti materiálů či výrobků.

Defektoskopie využívá vlastností ionizujícího záření, které snadno prochází různými materiály, aniž by je poškodilo, a při průchodu je zeslabováno a rozptylováno v závislosti na absorpčních koeficientech a struktuře materiálu. Po průchodu zkoušeným předmětem se výsledný obraz buď zachytí na radiografický film, nebo se převede do elektronické formy a zobrazí se na obrazovce (obrázek č. 1-13) [22].



Obrázek č. 1-13: Schéma nedestruktivního testování materiálu.

Příklady nedestruktivního testování: vyhledávání povrchových i vnitřních vad hutních výrobků, zajištění kontroly jakosti svárů dvou částí materiálu, kontrola strukturální nehomogenity materiálu, kontrola svařovaných spojů, kontrola železobetonových konstrukcí, kontrola ochranných krytů, strukturální kontrola materiálu, kontrola zavazadel, balíků. Tuto metodu lze provádět i přímo v terénu [22].

### 1.2.2 Radiační ochrana v defektoskopii

Základním preventivním bezpečnostním opatřením, které při nakládání s defektoskopickými zdroji záření musí implementováno do systému zabezpečování jakosti, je pravidelná kontrola a údržba zařízení (pravidelná vizuální kontrola zařízení, testování opotřebených spojovacích prvků, čištění funkčních prvků zařízení, pravidelné

promazání některých částí zařízení). Ke snížení radiačního rizika a k dosažení co nejnižší, optimalizované expozice osob je třeba uplatnit následující postupy [1]:

- správné vymezení kontrolovaného pásma a jeho účinná ostraha v době expozice,
- výběr doby k provedení požadovaného výkonu,
- výběr energie a aktivity uzavřeného zdroje ionizujícího záření resp. napětí u rentgenové trubice v závislosti na prováděné proceduře,
- výběr vhodného typu zařízení, případné použití stínících prostředků, pevných a pohyblivých zástěn,
- důsledné používání kolimace svazku,
- co nejbezpečnější pracovní místo operátora a ostatních pracovníků při expozici,
- výběr kvalitního a citlivého filmového materiálu,
- optimální délka expozice,
- správný vyvolávací proces,
- kontrola bezchybné funkce defektoskopu včetně bezpečnostních prvků a výstražných zařízení,
- soustavné monitorování pracovníků,
- pravidelné monitorování pracoviště,
- přímý dohled na pracovní výkon osobou k tomu způsobilou.

### ***1.2.3 Typy defektoskopů a typických aplikací***

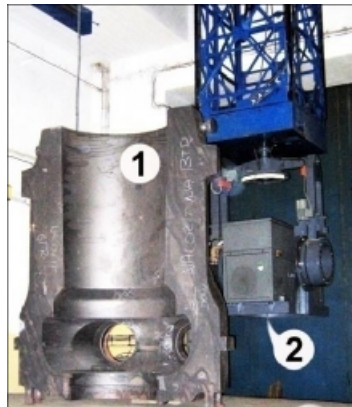
Typické vlastnosti zdrojů záření pro defektoskopii a rozsah pracovních energií a napětí v závislosti na požadovaných aplikacích jsou uvedeny v následující tabulce 1-2.

Tabulka 1-2: Orientační přehled zdrojů ionizujícího záření, pracovních energií a napětí pro defektoskopii [1]

Zkoumaný materiál			Defektoskopické aplikace		
Ocel - tloušťka [mm]	Lehké slitiny - tloušťka [mm]	Ostatní: plošná hustota [g/cm <sup>2</sup> ]	Generátory rentgenového záření, napětí [kV]	Zdroj záření gama	Aktivita [TBq]
2,5 - 12,5	7,5 - 45	2 - 10	60 - 140	<sup>170</sup> Tm, <sup>169</sup> Yb	< 1
10 - 60	40 - 190	10 - 50	140 - 400	<sup>192</sup> Ir, <sup>75</sup> Se	0,05 - 10
50 - 150	150 - 450	40 - 120	< 8000	<sup>60</sup> Co, <sup>137</sup> Cs	0,1 - 100

Mezi nejčastěji používané zdroje záření v defektoskopii patří [1]:

- 1. Rentgenová defektoskopická zařízení:** nejčastěji se používají rentgenové přístroje o napětí 60-320 kV. Při práci s tímto zdrojem ionizujícího záření je nutné sledovat parametry (ochranné vlastnosti krytu rentgenky, kolimace a filtrace svazku záření, výstražná signalizace a elektrická bezpečnost), které jsou důležité z hlediska radiační ochrany.
- 2. Urychlovače pro defektoskopii:** používají se pro zkoušení velkých tloušťek materiálu. Nejčastěji se používají lineární urychlovače s nosnou vlnou produkující vysoce energetické brzdné záření s maximální energií 3 – 5 MeV, výjimečně až 8 MeV (obrázek č. 1-14).



Obrázek č. 1-14: Prozařování odlitku urychlovačem Linatron M9.  
(1 – odlitek, 2 - Linatron M9).

- 3. Gama defektoskopie:** gama defektoskopické zařízení se skládá z expozičního zařízení se sadou zářičů gama uložených v defektoskopickém krytu a ovládacího zařízení. Zdrojem ionizujícího záření je hermeticky uzavřený radionuklid upevněný v nosiči v defektoskopickém krytu, kdy je záření emitováno kontinuálně do všech směrů (obrázek č. 1-15).



Obrázek č. 1-15: Gama defektoskopie (A: 1 – dálkové ovládání, 2 – výjezdová hadice, 3 – stojan, 4 – izotopový kryt se zdrojem IZ, 5 – kolimátory, 6 – výjezdová špička. B: Gammamat TI se ZIZ).

Všechna měřící zařízení používaná v defektoskopii musí splňovat požadavky specifikované v technických normách [29] a [30].

V závislosti na používaném zdroji záření jsou defektoskopická pracoviště řazena do I. nebo II. kategorie. Do I. kategorie řadíme pouze ta pracoviště, kde není vymezeno kontrolované pásmo (např. pokud je pracoviště vybaveno stabilním rentgenem, není vyžadováno zařazení pracovníků do kategorie A ani není vymežováno kontrolované pásmo). Je ale vhodné zabezpečit kontrolní osobní monitorování pracovníků formou operativního monitorování nebo osobního monitorování v delším sledovacím období.

Na přechodných pracovištích s technickými rentgeny je zpravidla kontrolované pásmo vymezeno a pracovníci jsou zařazeni do kategorie A. Pokud je kontrolované pásmo vymezeno, osobní monitorování pracovníků je vyžadováno v jednoměsíčním intervalu. Pokud se v některých případech vymezí pouze pásmo sledované, lze zavést osobní monitorování s delší periodou vyhodnocování osobních dozimetrů. Doporučuje se vždy na těchto přechodných pracovištích zajistit operativní osobní monitorování.

Defektoskopické pracoviště, kde jsou používány uzavřené radionuklidové zářiče gama ( $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) nebo urychlovač, je vždy zařazeno do II. kategorie s vymezeným kontrolovaným pásmem, tudíž musí být u radiačních pracovníků zavedeno sledování osobních dávek s jednoměsíčním kontrolním obdobím. V případě použití mobilního defektoskopického zařízení musí být pracovníci vybaveni vždy také vhodným operativním dozimetrem [5].

#### **1.2.4 Osobní monitorování zevního ozáření v defektoskopii**

Základem osobního monitorování pracovníků na defektoskopickém pracovišti je sledování a vyhodnocení osobních dávek, které pracovníci obdrželi při činnosti se zdroji ionizujícího záření.

Cílem tohoto osobního monitorování pracovníků defektoskopie je:

- přispět k dodržení stanovených limitů

- stanovit pravděpodobnost případného nadlimitního ozáření pracovníků
- poskytnout informace pro operativní rozhodování o individuálním monitorování
- vyhodnotit pracovní riziko vyplývající z činností uživajících zdroje ionizujícího záření [3].

V dnešní době se na defektoskopických pracovištích používá k osobnímu monitorování pracovníků zejména filmový nebo TLD. TLD je upřednostněn ve všech případech, kde se pracuje v prostředí s vyšší teplotou, filmový dozimetr je upřednostněn tam, kde je pravděpodobný výskyt elektronů, případně, kde se nepoužívají fotony s energií vyšší než cca 0,2 MeV. Při určitých činnostech jako např. odstraňování závad nebo likvidace nehody, kdy je větší pravděpodobnost ozáření rukou, se navíc doporučuje prstový dozimetr.

#### ***1.2.4.1 Osobní monitorování zevního ozáření v defektoskopii u fy Kulle Praha***

Monitorování zevního ozáření pracovníků na defektoskopickém pracovišti u fy Kulle se uskutečňuje jednak osobními filmovými dozimetry, jednak na základě údajů monitorů pracovního prostředí (měřidlo dávkového příkonu RDS 110 vyrobené firmou RADOS [14]), obrázek č. 1-16.

Pomocí měřidla dávkového příkonu RDS 110 jsou výsledky monitorování pracovního prostředí známy okamžitě po odečtení údaje z displeje přístroje.





Obrázek č. 1-16: Měřidlo dávkového příkonu  
RDS 110 vyrobené firmou RADOS.

Záznam o celkové dávce, kterou pracovník obdržel při činnosti se zdrojem ionizujícího záření, je v případě normálního provozu z filmového dozimetru odečten vždy v měsíčních intervalech. Pokud jsou zjištěny odchylky od normálního provozu, či při podezření, že došlo k neplánovanému jednorázovému ozáření pracovníka, předávají se filmové dozimetry k okamžitému vyhodnocení.

Filmové dozimetry jsou pravidelně vyhodnocovány dozimetrickou službou CSOD, která seznamuje pracovníky s výsledky osobního monitorování prostřednictvím dokumentu obsahujícího celkové osobní dávky, které pracovníci při své činnosti obdrželi.

#### ***1.2.5 Nejčastější příčiny nepřijatelného ozáření pracovníků defektoskopii***

K nejčastějším a nejzávažnějším případům nepřijatelného ozáření v defektoskopii dochází v případech, pokud dojde ke ztrátě kontroly nad zdrojem ionizujícího záření. Proto je vždy nezbytně nutné před začátkem každého pracovního výkonu proměřit dávkový příkon na pracovišti se zdrojem záření, v blízkosti tohoto zdroje záření, na povrchu pracovních krytů a porovnat tyto naměřené hodnoty dávkových příkonů s hodnotami naměřenými při předchozím měření [1].

Nestandardní situace, mimořádné události, nehody a havárie mohou vést ke zvýšenému, nepřijatelnému ozáření radiačních pracovníků. Mezi základní problematické situace v defektoskopii, které mohou nastat během práce se zdrojem ionizujícího záření, patří [1]:

- zdroj záření zůstane v projekčním kolimátoru a nelze ho zpět zasunout do stíněné polohy v pracovním krytu,
- zdroj záření zůstane ve výjezdové hadici,
- zdroj záření je zpětně umístěn do stínícího krytu, ale v nesprávné stínící poloze (kolem kontejneru je ze všech stran zvýšený dávkový příkon v místech výjezdu zdroje záření z krytu),
- zdroj záření při zatahování vyjede ven z krytu na stranu ovládacího zařízení (kolem kontejneru je ze všech stran zvýšený dávkový příkon v místech připojení ovládacího zařízení).

Při řešení všech nestandardních situací je nezbytné, aby ve vnitřním havarijním plánu každého provozovatele byly uvedeny postupy při předvídatelných poruchách zařízení a zároveň, aby tyto postupy byly řádně nacvičeny.

## 2. Cíle práce a hypotézy

### Cíle práce

- Použití elektronických osobních dozimetrů (DMC 2000 XB) na defektoskopickém pracovišti a měření osobních dávek paralelně s dosud používanými filmovými dozimetry.
- Porovnávání osobních dávek naměřených oběma typy dozimetrů.
- Vyhodnocení výhod a nevýhod obou dozimetrických systémů.
- Doporučení výhodnějšího dozimetrického systému pro monitorování osobních dávek pracovníků při defektoskopických pracích.

### Hypotézy

- Výrobci elektronických dozimetrů (MGP Instruments SA) a filmových dozimetrů udávají, že energetická závislost odezvy obou typů dozimetrických systémů na fotonové záření je shodná.
- Při defektoskopických pracích se používají různé druhy ionizujícího záření (neutrony, záření gama, rentgenové záření a brzdné záření generované na lineárních urychlovačích) o širokém rozsahu dávkových příkonů, proto je zde reálná možnost, že pracovníci mohou obdržet vyšší dávky, než stanovují limity.

### **3. Metodika**

Souběžně s doposud používanou filmovou osobní dozimetrií byly na defektoskopickém pracovišti firmy Kulle PK-Q, Na Pokraji 2/540, Praha 9 - Prosek, zavedeny elektronické dozimetry DMC 2000 XB. Poté následovalo měření a statistické zpracování a porovnání výsledků osobních dávek naměřených elektronickými a filmovými dozimetry.

#### **3.1 *FD a ED na defektoskopickém pracovišti***

##### **3.1.1 *FD v defektoskopii***

Na defektoskopickém pracovišti u firmy Kulle používají pracovníci pro monitorování osobních dávek filmové dozimetry dodávané a vyhodnocované dozimetrickou službou CSOD. Jedná se o dozimetrický film Foma PMF, který je umístěn v dozimetrické kazetě vyráběné a dodávané CSOD. Foma PMF je komplet dvou filmů určených pro osobní dozimetrii záření gama, rentgenového záření a záření beta.

Vlastnosti a technické parametry filmového dozimetru, stejně jako postup vyhodnocení filmu z filmového dozimetru již byly uvedeny v kapitole 1.1.6.1.

Výsledky vyhodnocení filmových dozimetrů zasílá CSOD odpovědnému pracovníkovi uživatele dozimetrické služby a CRPO [16] k celostátní registraci pro potřeby orgánů státního dozoru [18].

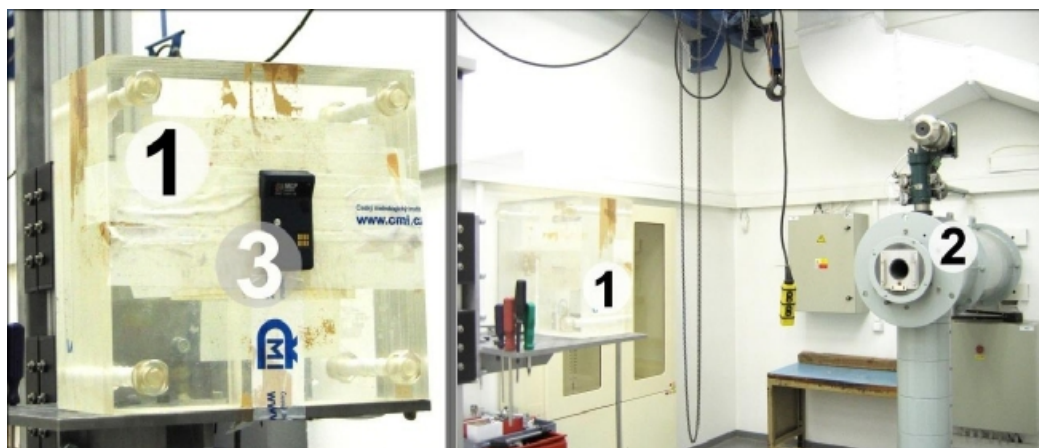
### **3.1.2 ED DMC 2000 XB v defektoskopii**

Elektronické dozimetry DMC 2000 XB byly zavedeny společně s dosud používanými filmovými dozimetry na defektoskopické pracoviště firmy Kulle. Elektronický dozimetr byl přidělen pětičlenné skupině pracovníků, jejíž členové podle výsledků z filmové dozimetrie z předešlých let obdrželi nejvyšší dávky. Elektronický dozimetr nosil vybraný pracovník na referenčním místě vedle filmového dozimetru.

#### **Kalibrace ED DMC 2000 XB**

Kalibrace elektronických dozimetrů se provádí podle doporučených postupů uvedených v ISO publikacích [41] a [42] a v publikaci [34]. Kalibrace elektronického osobního dozimetru je také popsána v kapitole 1.1.6.2.

V ČMI - IIZ byly ověřeny elektronické dozimetry DMC 2000 XB tj. bylo potvrzeno, že dozimetry splňují požadované metrologické vlastnosti. Citlivost a linearita odezvy dozimetru DMC 2000 XB byla ověřena ve svazcích záření gama z radionuklidu  $^{137}\text{Cs}$ , kdy měřidlo je na všech dekádách měřicího rozsahu vystaveno různým úrovním příkonu kermy ve vzduchu (obrázek č. 3-1). Kermový příkon [7] je přepočten na veličinu osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$ , ve které je zobrazován údaj měřidla [15]. Při ověření bylo měřidlo umístěné na fantomu PMMA, což je kvádr o rozměrech  $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$  z tkáňekvivalentního materiálu.

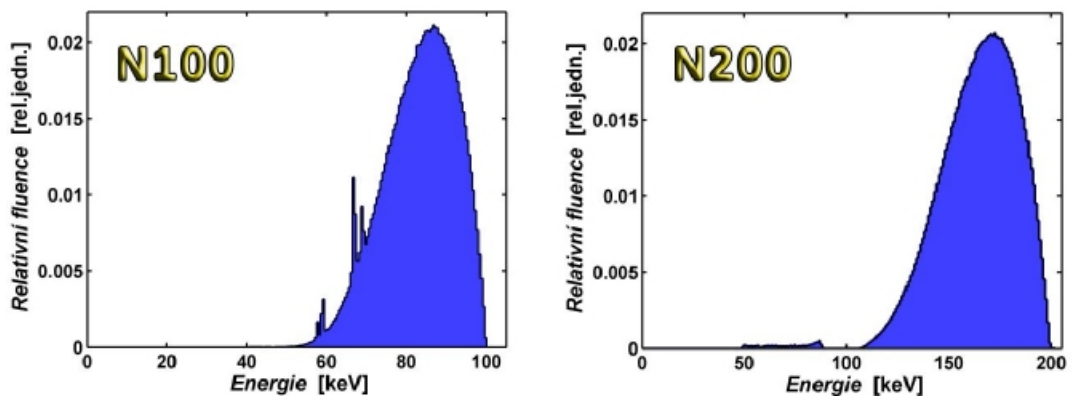


Obrázek č. 3-1: Ověřování ED DMC 2000 XB v ČMI - IIZ  
*(1 – fantom PMMA 30x30x15 cm<sup>3</sup>, 2 - ozařovač G7, 3 – dozimetr DMC 2000 XB)*

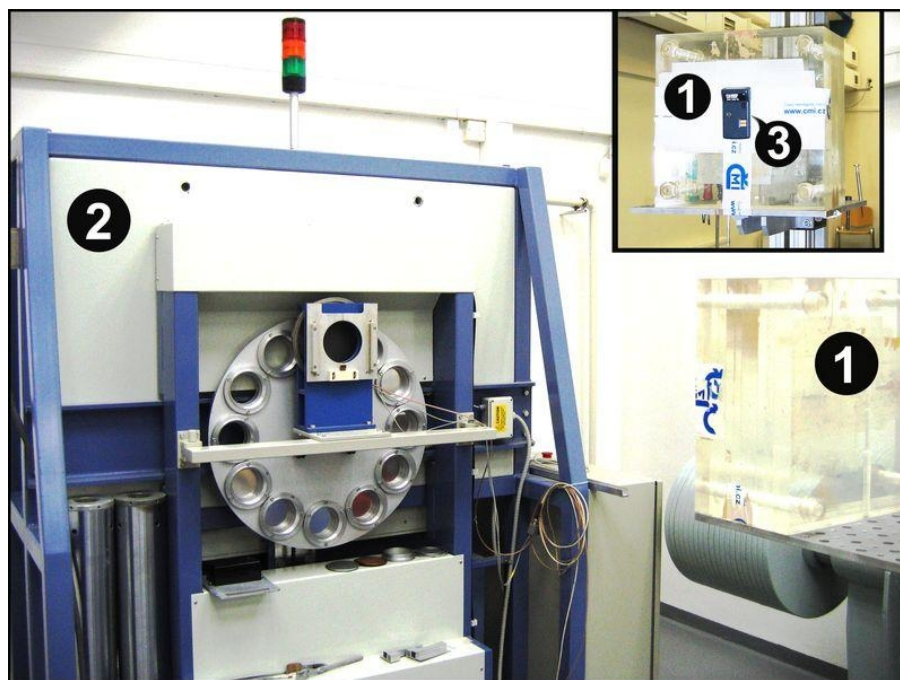
Dále byla v ČMI - IIZ změřena energetická závislost odezvy DMC 2000 XB ve svazcích rentgenového záření v kvalitách N20 až N250 (tabulka 3-1, obrázek č. 3-2) podle [41]. Schematické znázornění je uvedeno na obrázku č. 3-3.

Tabulka 3-1: Rentgenová spektra řady N a jejich vlastnosti [8].

Označení spektra	Napětí na rentgence (kV)	Efektivní energie (keV)
N20	20	16,3
N30	30	24,6
N40	40	33,3
N60	60	47,9
N80	80	65,2
N100	100	83,3
N120	120	100,4
N150	150	118,2
N200	200	164,8
N250	250	207,3
N300	300	248,4



Obrázek č. 3-2: Příklady rentgenových spekter řady N pro stanovení energetické závislosti odezvy ED DMC 2000 XB.



Obrázek č. 3-3: Měření energetické závislosti pomocí svazků rentgenového záření v ČMI - IIZ.

(1 – fantom PMMA 30x30x15cm, 2 – rentgen Isovolt HS 160, 3 – elektronický dozimetr DMC 2000 XB)

U elektronických dozimetrů DMC 2000 XB byla otestována závislost jejich odezvy k různým druhům ionizujícího záření (obrázek č. 3-4).

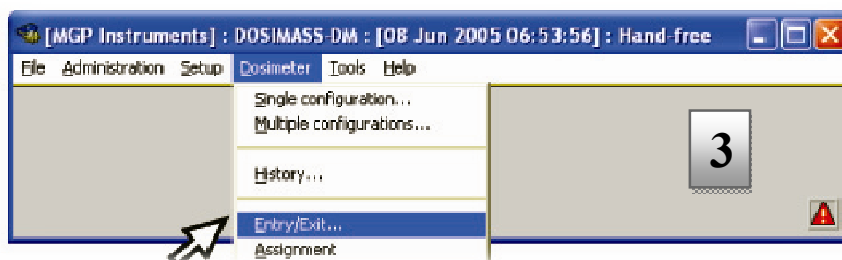


Obrázek č. 3-4: Měření odezvy ED DMC 2000 XB k záření beta a gama v ČMI - IIZ. (*A: zářič  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ , B: zářič  $^{192}\text{Ir}$  a  $^{75}\text{Se}$ , C: elektronický dozimetr DMC 2000 XB umístěný na fantomu PMMA 30x30x15 cm<sup>3</sup>*)

#### ***Vyhodnocení ED DMC2000 XB***

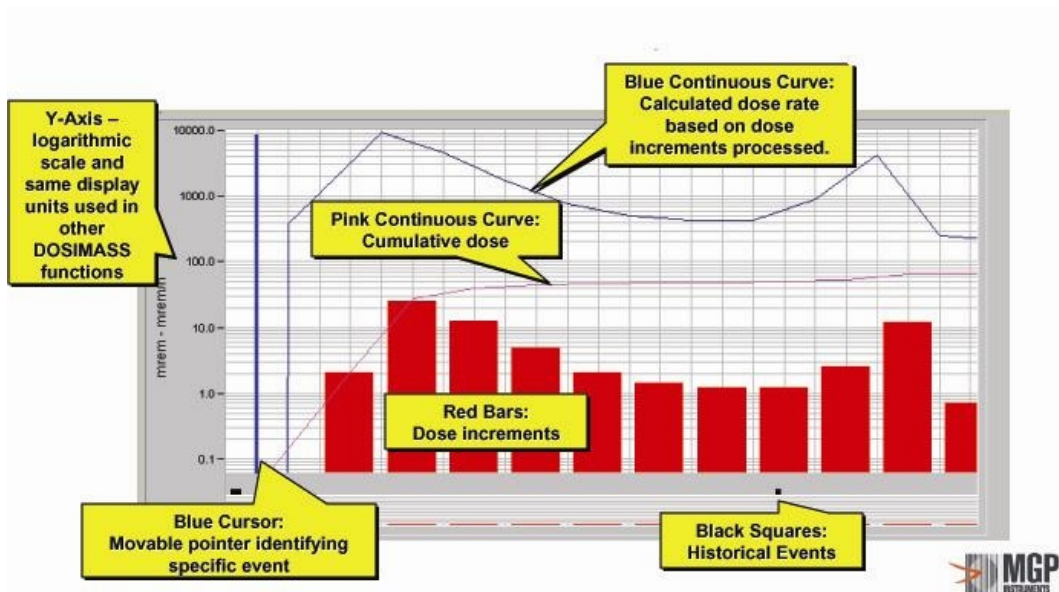
Elektronický dozimetr byl pracovníkům defektoskopie vždy přidělen na období jednoho měsíce. Poté byly dozimetry odebrány a v nich uložená data pomocí čtečky LDM 220 a programu DOSIMASS [17] přenesena do počítače (obrázek č. 3-5).





Obrázek č. 3-5: Sestava pro vyhodnocení osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$ ,  $H_p(0.07)$  z ED. (1 – čtečka LDM 220, 2 – dozimetr DMC 2000 XB, 3 - hlavní menu softwaru DOSIMASS)

Funkce *History* v programu DOSIMASS zobrazí průběh naměřených osobních dávek ve 24 hodinových intervalech. Tento průběh výsledných hodnot o obdržených osobních dávkách z dozimetrů DMC 2000 XB je možné pomocí dalších funkcí programu exportovat do tabulek, textu a grafů. Obrázek č. 3-6 znázorňuje grafické zobrazení naměřených hodnot v programu DOSIMASS.



Obrázek č. 3-6: Grafické zobrazení naměřených osobních dávek programem DOSIMASS v průběhu 12 měsíčního monitorovacího období.

### 3.2 Měření osobních dávek při různých pracovních činnostech

Pracovníci v defektoskopické firmě Kulle vykonávají nedestruktivní testování materiálů v různých oblastech průmyslu (strojírenský, letecký, automobilový průmysl, činnosti na jaderných elektrárnách, atd.). Tuto činnost vykonávají defektoskopičtí pracovníci jak na stabilním pracovišti v Praze, tak na montážních pracovištích v Brně a Uničově.

Pracovníci při těchto činnostech používají různé zdroje ionizujícího záření; radionuklidové zdroje  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{60}\text{Co}$  o širokém rozpětí aktivit od stovek MBq po jednotky TBq a rentgenové záření generované elektrony urychlenými napětím v rozsahu 160 – 400 kV.

### **3.3 *Vyhodnocování a statistické zpracování osobních dávek***

Filmové dozimetry defektoskopických pracovníků byly standardně zasílány každý měsíc k pravidelnému vyhodnocení do dozimetrické služby CSOD. Po vyhodnocení byly výsledné hodnoty o obdržených měsíčních dávkách zaznamenány a statisticky zpracovány do souhrnných tabulek a grafů.

Vyhodnocení dávek z elektronických dozimetru DMC 2000 XB probíhalo také v měsíčních intervalech. Dozimetry byly odebírány a za pomoci čtečky a softwaru DOSIMASS byly přeneseny do počítače údaje o zaznamenaných dávkách. Později byly získané údaje zpracovány obdobně jako údaje získané z filmových dozimetrů.

### **3.4 *Posouzení výhod a nevýhod FD a ED***

Výhody a nevýhody kterékoliv dozimetrické metody je obtížné určit obecně, vždy je potřeba vycházet ze záměru, ke kterému bude dozimetr použit. Je skutečností, že vzhledem k podmínkám měření může být některá výhoda příslušného dozimetrického systému na závadu nebo naopak nevýhoda být spíše předností.

U filmových a elektronických dozimetrů na základě doporučení v publikacích [2], [18], [9] a [10] byly stanoveny a porovnány výhody a nevýhody těchto dvou dozimetrických metod.

## 4. Výsledky

Nejprve budou uvedeny výsledky dávkové závislosti odezvy ED DMC 2000 XB ve svazcích záření gama a beta, dále energetická závislost odezvy výše uvedeného dozimetru ve svazcích rentgenového záření.

V další části této kapitoly budou prezentovány výsledky z osobního monitorování pracovníků v defektoskopii získané z filmové a elektronické dozimetrie.

### 4.1 *Dávková závislost ED*

Elektronický dozimetr DMC 2000 XB při ověření v ČMI - IIZ splnil požadavek podle publikace [15], kdy hodnoty  $\delta$  vypočítané podle vztahu (1) leží v intervalu  $\pm 25\%$ . Výsledky ověření vybraného osobního dozimetru uvádí následující tabulka 4-1 a obrázek č. 4-1.

$$\delta = \left( \frac{\text{údaj měřidla} - \text{referenční dávka}}{\text{referenční dávka}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

Tabulka 4-1: Měření odezvy ED DMC 2000 XB ve svazcích záření gama, dozimetry umístěny na fantomu PMMA.

**Podmínky měření:**

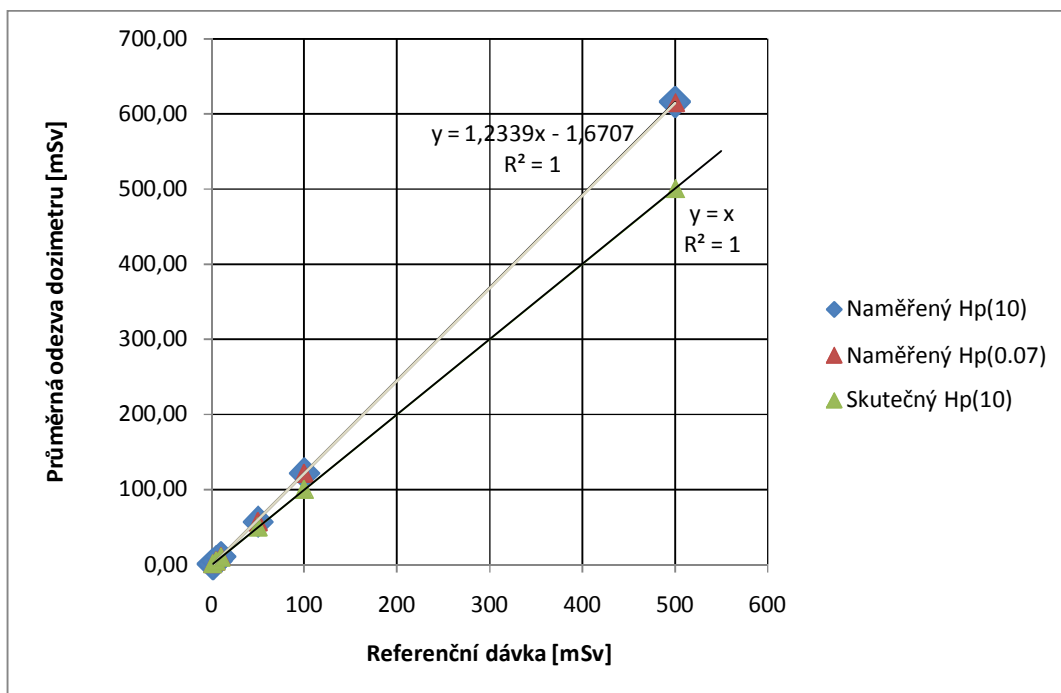
Teplota: 23,8 %

Tlak: 978 hPa

Vlhkost: 48,1 %

		Referenční dávka [mSv]	1		5		10		50		100		500	
č. dozimetru	Zářič	Odezva měřidla [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]
379897L2	<sup>137</sup> Cs		1,03	1,03	5,22	5,22	10,92	10,92	57,54	57,54	121,29	121,29	610,00	610,00
379863L2	<sup>137</sup> Cs		1,01	1,01	5,19	5,16	10,70	10,76	57,17	57,21	123,93	123,87	626,00	625,00
379910L2	<sup>137</sup> Cs		1,03	1,03	5,12	5,12	10,75	10,75	56,68	56,67	119,43	119,43	617,00	616,00
379851L2	<sup>137</sup> Cs		1,01	1,01	5,24	5,23	10,93	10,91	57,93	57,96	122,89	122,89	609,00	608,00
		P	1,02	1,02	5,19	5,18	10,82	10,83	57,33	57,35	121,89	121,87	615,50	614,75
		s	0,01	0,01	0,05	0,05	0,12	0,09	0,54	0,54	1,96	1,94	7,85	7,63
		δ [%]	1,77	1,77	3,87	3,63	8,23	8,33	14,66	14,69	21,89	21,87	23,10	22,95

- P - aritmetický průměr,
- s - směrodatná odchylka,
- δ - odchylka naměřené hodnoty od referenční hodnoty.



Obrázek č. 4-1: Průměrná naměřená odezva ED DMC 2000 XB ve svazcích záření gama -  $^{137}\text{Cs}$ .

Pro porovnání osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$  a  $H_p(0.07)$  byla také změřena odezva elektronického dozimetru DMC 2000 XB k záření beta z radionuklidového zářiče  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  a k záření gama z radionuklidových zářičů  $^{192}\text{Ir}$  a  $^{75}\text{Se}$ . Výsledky shrnují tabulky 4-2, 4-3 a 4-4.

Tabulka 4-2: Měření odezvy ED DMC 2000 XB k záření beta volně v prostoru.

Zdroj IZ:  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$

Aktivita ke dni 8.4.2008: 5,19 MBq

Maximální energie  $\beta$  [11]: 2,270 MeV

Efektivní energie  $\beta$  [11]: 0,935 MeV

		Referenční dávka [mSv]	2,12		64,38	
č. dozimetru	Zářič	Odezva měřidla [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]
379897L2	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$		0,14	2,24	3,40	83,81
379863L2	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$		0,15	2,40	3,13	80,62
379910L2	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$		0,17	2,50	3,33	83,40
379851L2	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$		0,14	2,24	2,95	85,90
		<b>P</b>	<b>0,15</b>	<b>2,34</b>	<b>3,20</b>	<b>83,43</b>
		<b>s</b>	<b>0,01</b>	<b>0,13</b>	<b>0,20</b>	<b>2,17</b>
		<b><math>\delta</math> [%]</b>	<b>-</b>	<b>10,63</b>	<b>-</b>	<b>29,59</b>

Tabulka 4-3: Měření odezvy ED DMC 2000 XB k záření gama, dozimetry umístěny na fantomu PMMA.

Zdroj IZ:  $^{192}\text{Ir}$

Aktivita ke dni 8.4.2008: 922,4 GBq

Maximální energie  $\gamma$  (výtěžek > 10 %) [24]: 0,468 MeV

Maximální energie  $\beta$  [24]: 0,672 MeV

		Referenční dávka [mSv]	7,6		76		128	
č. dozimetru	Zářič	Odezva měřidla [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]
379897L2	$^{192}\text{Ir}$		7,76	8,17	76,24	85,53	105,90	141,60
379863L2	$^{192}\text{Ir}$		7,77	7,90	84,30	88,20	101,50	123,00
379910L2	$^{192}\text{Ir}$		7,81	8,10	76,90	87,40	111,00	124,00
379851L2	$^{192}\text{Ir}$		7,95	8,56	80,10	83,90	117,00	154,00
		<b>P</b>	<b>7,82</b>	<b>8,18</b>	<b>79,39</b>	<b>86,26</b>	<b>108,85</b>	<b>135,65</b>
		<b>s</b>	<b>0,09</b>	<b>0,28</b>	<b>3,68</b>	<b>1,93</b>	<b>6,68</b>	<b>14,92</b>
		<b><math>\delta</math> [%]</b>	<b>2,89</b>	<b>7,63</b>	<b>4,46</b>	<b>13,50</b>	<b>-14,96</b>	<b>5,98</b>

Tabulka 4-4: Měření odezvy ED DMC 2000 XB k záření gama, dozimetry umístěny na fantomu PMMA.

Zdroj IZ:  $^{75}\text{Se}$   
 Aktivita ke dni 8.4.2008: 2,272 TBq  
 Maximální energie  $\gamma$  [23]: 0,401 MeV  
 Maximální energie  $\beta$  [23]: -

		Referenční dávka [mSv]	3		25		86	
č. dozimetru	Zářič	Odezva měřidla [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]	Hp(10) [mSv]	Hp(0.07) [mSv]
379897L2	$^{75}\text{Se}$		3,08	3,24	26,94	29,17	93,08	103,00
379863L2	$^{75}\text{Se}$		3,13	3,22	27,67	28,68	106,40	110,00
379910L2	$^{75}\text{Se}$		3,34	3,38	28,16	28,92	106,00	108,70
379851L2	$^{75}\text{Se}$		3,22	3,48	27,59	29,92	107,20	105,60
		<b>P</b>	<b>3,19</b>	<b>3,33</b>	<b>25,09</b>	<b>29,17</b>	<b>103,17</b>	<b>106,83</b>
		<b>s</b>	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>	<b>0,50</b>	<b>0,54</b>	<b>6,75</b>	<b>3,15</b>
		<b><math>\delta</math> [%]</b>	<b>6,37</b>	<b>10,96</b>	<b>0,36</b>	<b>16,70</b>	<b>19,97</b>	<b>24,22</b>

Ve výše uvedených tabulkách 4-2 – 4-4 je **P** aritmetický průměr, **s** - směrodatná odchylka,  **$\delta$**  – odchylka naměřené hodnoty od referenční hodnoty.

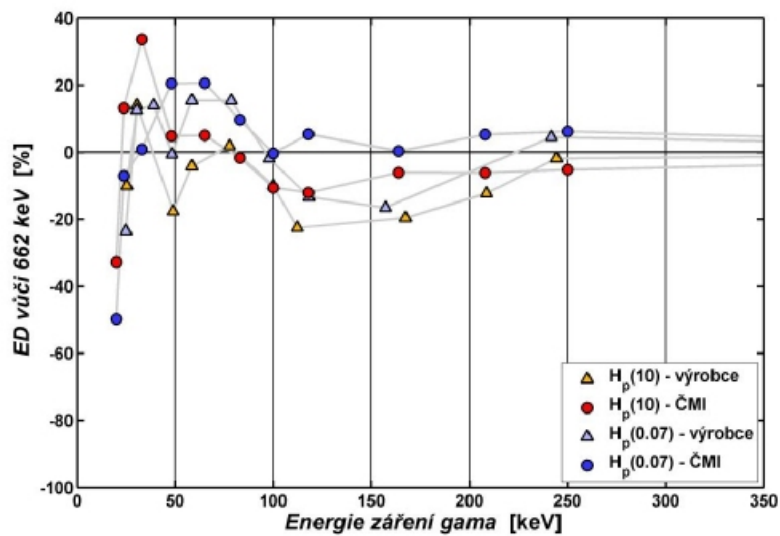
#### 4.2 Energetická závislost ED

Energetická závislost odezvy elektronického dozimetru DMC 2000 XB byla změřena ve svazcích rentgenového záření v kvalitách svazků N20 až N250 a ve svazcích záření gama z radionuklidového zdroje  $^{137}\text{Cs}$  (tabulka 4-5). Výsledná energetická závislost je uvedena na obrázcích č. 4-2 a 4-3.

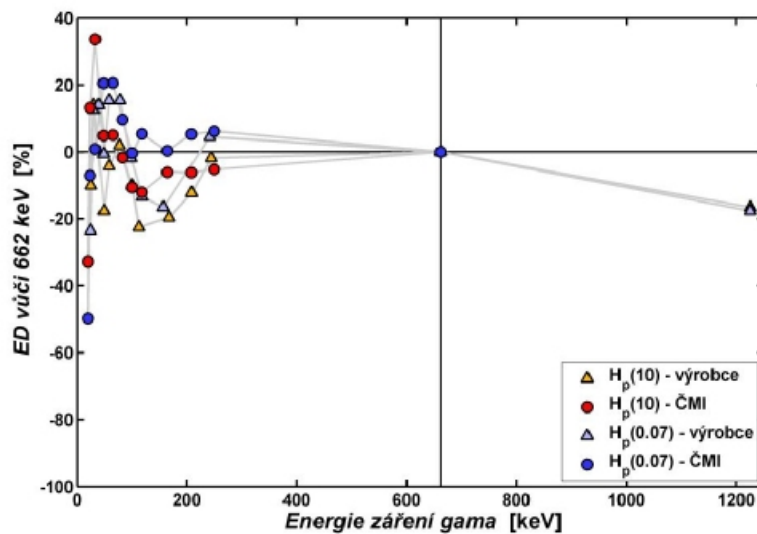


Tabulka 4-5: Měření energetické závislosti odezvy ED DMC 2000 XB ve svazcích rentgenového záření a záření gama v ČMI - IIZ.

$N_x$	$E_{ef}$ [keV]	$H_p(0.07)_{ref}$ [mSv]	$H_p(0.07)_{naměř}$ [mSv]	$\frac{H_p(0.07)_{ref}}{H_p(0.07)_{naměř}}$	$H_p(10)_{ref}$ [mSv]	$H_p(10)_{naměř}$ [mSv]	$\frac{H_p(10)_{ref}}{H_p(10)_{naměř}}$
N20	16	0,21	0,11	0,52	0,12	0,09	0,70
N30	25	0,22	0,22	0,97	0,16	0,19	1,18
N40	33	0,25	0,27	1,05	0,24	0,34	1,39
N60	48	0,32	0,40	1,26	0,34	0,37	1,09
N80	65	0,34	0,43	1,26	0,38	0,42	1,09
N100	83	0,35	0,39	1,14	0,38	0,39	1,03
N120	100	0,33	0,35	1,04	0,36	0,34	0,93
N150	118	0,32	0,35	1,10	0,34	0,31	0,92
N200	165	0,30	0,31	1,05	0,31	0,30	0,98
N250	207	0,28	0,31	1,10	0,30	0,29	0,98
N300	250	0,28	0,31	1,11	0,28	0,28	0,99
$^{137}\text{Cs}$	667	1,00	0,96	1,04	1,00	0,96	1,04



Obrázek č. 4-2: Energetická závislost odezvy ED DMC 2000 XB (rentgenové záření o rozsahu efektivních energií 20 keV – 250 keV)



Obrázek č. 4-3: Energetická závislost odezvy ED DMC 2000 XB (rentgenové záření o rozsahu efektivních energií 20 keV – 250 keV a  $^{137}\text{Cs}$  – 667 keV)

#### 4.3 Výsledky osobního monitorování defektoskopických pracovníků

Měsíční individuální osobní dávkové ekvivalenty  $H_p(10)$ ,  $H_p(0.07)$  sledovaných defektoskopických pracovníků z filmových a elektronických dozimetrů jsou prezentovány v souhrnné tabulce 4-6. Detailnější porovnání dávek uvádějí následující kapitoly.

Tabulka 4-6: Naměřené hodnoty osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$ ,  $H_p(0.07)$  během různých pracovních činností z elektronické (ED) a z filmové (FD) dozimetrie.

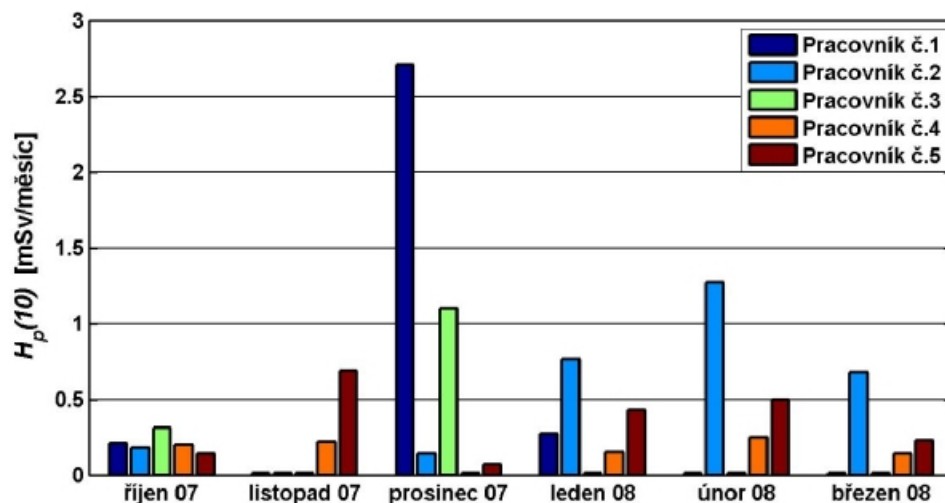
Období	Pracovník	$H_p(10)$ [mSv] ED	$H_p(0.07)$ [mSv] ED	$H_p(10)$ [mSv] FD	$H_p(0.07)$ [mSv] FD	Činnost*
říjen 07	1	0,16	0,22	0,21	0,21	0,1,2,5
listopad 07		0,09	0,15	<0,05	<0,05	
prosinec 07		2,64	2,66	2,71	2,42	
leden 08		0,22	0,24	0,27	0,27	
únor 08		0,09	0,15	<0,05	<0,05	
březen 08		0,09	0,19	<0,05	<0,05	
říjen 07	2	0,1	0,23	0,18	0,18	1,2,3,6
listopad 07		0,09	0,19	<0,05	<0,05	
prosinec 07		0,14	0,22	0,14	0,14	
leden 08		0,69	0,69	0,76	0,76	
únor 08		1,03	1,04	1,27	1,27	
březen 08		0,64	0,66	0,68	0,68	
říjen 07	3	0,2	0,26	0,31	0,31	1,2,4,5
listopad 07		0,08	0,15	<0,05	<0,05	
prosinec 07		0,95	0,97	1,1	0,96	
leden 08		0,04	0,19	<0,05	<0,05	
únor 08		0,04	0,19	<0,05	<0,05	
březen 08		0,1	0,18	<0,05	<0,05	
říjen 07	4	0,18	0,21	0,2	0,2	1,2,3,5
listopad 07		0,21	0,23	0,22	0,22	
prosinec 07		0,1	0,18	<0,05	<0,05	
leden 08		0,13	0,18	0,15	0,15	
únor 08		0,23	0,25	0,25	0,25	
březen 08		0,12	0,21	0,14	0,14	
říjen 07	5	0,13	0,2	0,14	0,14	1,2,3,6
listopad 07		0,61	0,62	0,69	0,69	
prosinec 07		0,07	0,19	0,07	0,07	
leden 08		0,39	0,39	0,43	0,43	
únor 08		0,43	0,46	0,5	0,5	
březen 08		0,22	0,24	0,23	0,23	

\* Pracovní činnosti s ionizujícím zářením v defektoskopické firmě Kulle:

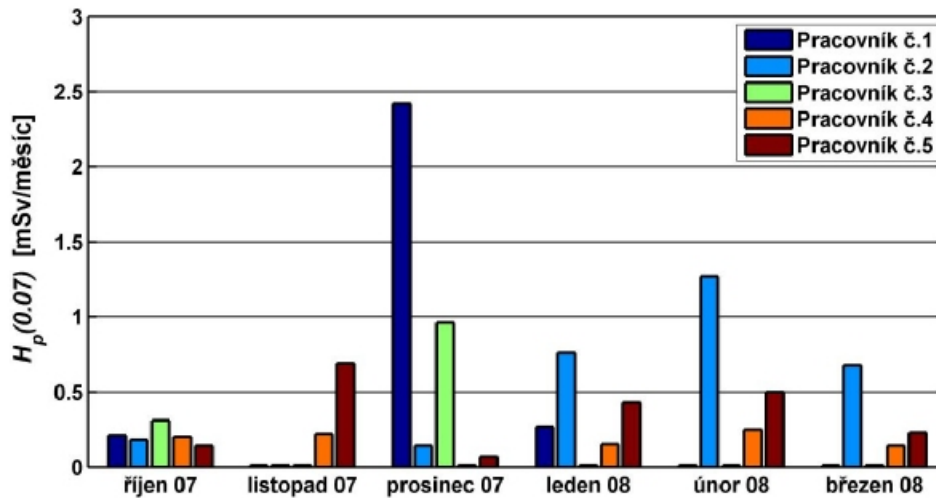
- 0 Práce bez zdroje ionizujícího záření (kancelářská práce)
- 1 Nedestruktivní kontrola materiálů na stabilním pracovišti, používaný zdroj: RTG lampy 225 kV, 400 kV.
- 2 Nedestruktivní kontrola materiálů na stabilním pracovišti, používaný zdroj:  $^{192}\text{Ir}$ .
- 3 Nedestruktivní kontrola materiálů na stabilním pracovišti, používaný zdroj:  $^{75}\text{Se}$ .
- 4 Nedestruktivní kontrola materiálů na mobilních pracovištích: RTG lampy 160 kV.
- 5 Nedestruktivní kontrola materiálů na mobilních pracovištích:  $^{192}\text{Ir}$ .
- 6 Nedestruktivní kontrola materiálů na mobilních pracovištích:  $^{75}\text{Se}$ .
- 7 Zpracování radiogramů – pracovní činnost bez použití ionizujícího záření.

#### 4.3.1 Výsledné hodnoty osobních dávkových ekvivalentů - FD

Měsíční hodnoty osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$  a  $H_p(0.07)$  z filmových dozimetrů znázorňují obrázky č. 4-4 a 4-5.



Obrázek č. 4-4: Osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  sledovaných pracovníků v jednotlivých měsících stanovený z FD.



Obrázek č. 4-5: Osobní dávkový ekvivalent  $H_p(0.07)$  sledovaných pracovníků v jednotlivých měsících stanovený z FD.

Z naměřených dávek byly následně vypočítány, za pomoci kalibračního faktoru (kapitola 1.1.6.1.1), šestiměsíční individuální efektivní dávky  $E$  pracovníků podle vztahu (2), individuální ekvivalentní dávky  $H_t$  na kůži podle vztahu (3) a kolektivní dávka  $S$  vybrané skupiny defektoskopických pracovníků podle vztahu (4).

$$E = \sum_{i=1}^6 (H_p(10))_i \times f_1 \quad (2)$$

$$H_t = \sum_{i=1}^6 (H_p(0.07))_i \times f_2 \quad (3)$$

$$S = \sum E_j \quad (4)$$

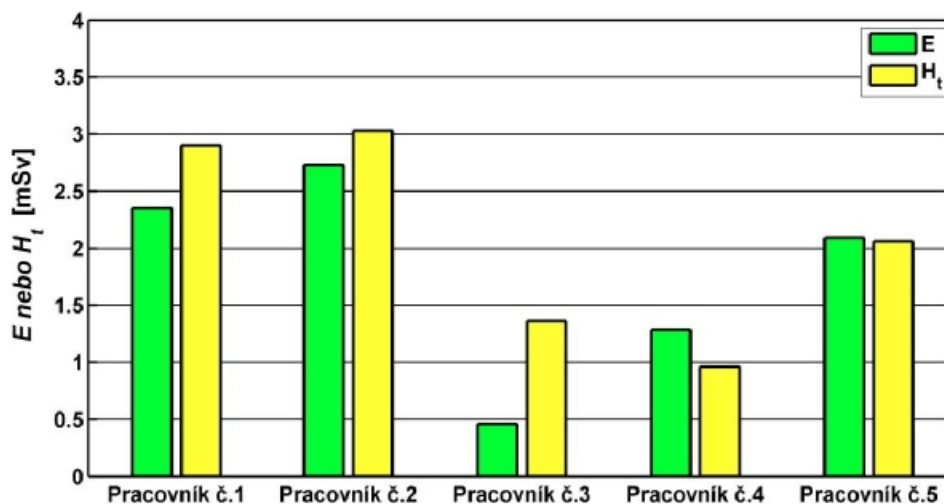
kde  $E_j$  je šestiměsíční efektivní dávka jednotlivého pracovníka. Kalibrační faktory  $f_1$ ,  $f_2$  jsou funkcí energie záření a platí [19], [37]:

- $f_1 = 0,9$  pro  $^{192}\text{Ir}$ ,
- $f_1 = 0,7$  pro rentgenové záření,
- $f_2 = 1$ .

Statisticky zpracované výsledky osobního monitorování z filmové dozimetrie byly získány přímo od dozimetrické služby CSOD. Přehled naměřených a vypočítaných hodnot je uveden v následující tabulce 4-7 a znázorněn na obrázku č. 4-6.

Tabulka 4-7: Výsledné hodnoty osobního monitorování defektoskopických pracovníků z FD za šestiměsíční monitorovací období.

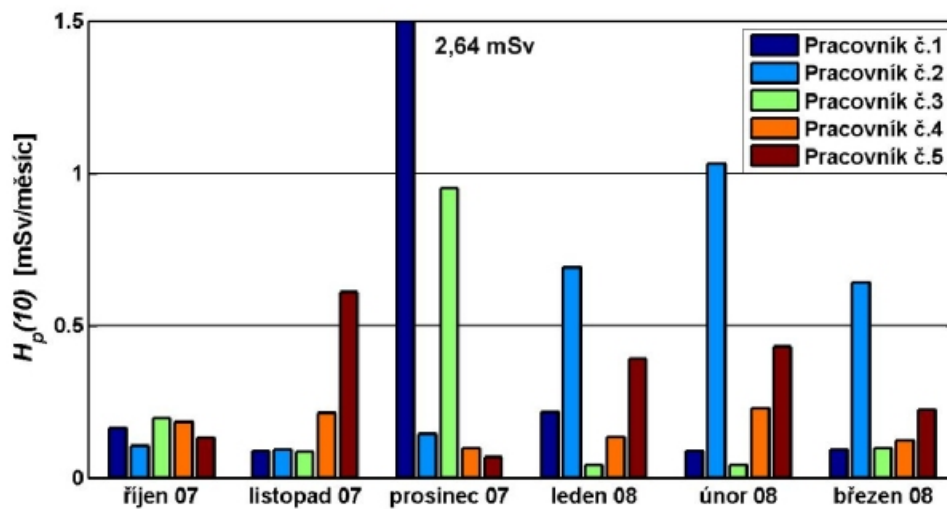
Pracovník	Období	$\Sigma H_p(10)$ [mSv]	$\Sigma H_p(0.07)$ [mSv]	E [mSv]	$H_t$ [mSv]	S [mSv]
1	říjen 07 – březen 08	3,19	2,90	2,35	2,90	8,92
2	říjen 07 – březen 08	3,03	3,03	2,73	3,03	
3	říjen 07 – březen 08	1,50	1,36	0,46	1,36	
4	říjen 07 – březen 08	0,96	0,96	1,29	0,96	
5	říjen 07 – březen 08	2,06	2,06	2,09	2,06	



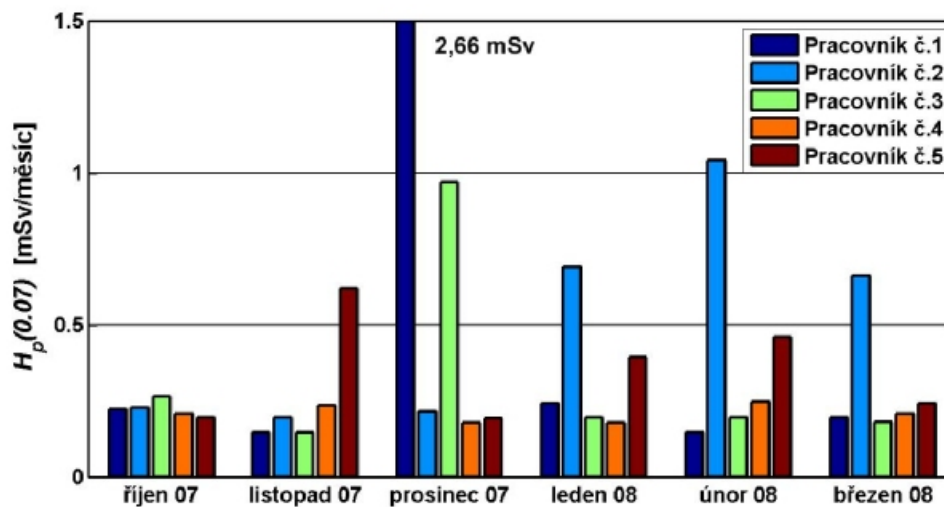
Obrázek č. 4-6: Hodnoty efektivní dávky E a ekvivalentní dávky  $H_t$  v šestiměsíčním období z FD získané od CSOD.

#### 4.3.2 Výsledné hodnoty osobních dávkových ekvivalentů - ED

Hodnoty měsíčních osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$ ,  $H_p(0.07)$  sledovaných defektoskopických pracovníků naměřené elektronickými dozimetry popisují níže uvedené obrázky č. 4-7 a 4-8 .



Obrázek č. 4-7: Osobní dávkový ekvivalent  $H_p(10)$  sledovaných pracovníků v jednotlivých měsících stanovený z ED DMC 2000 XB.



Obrázek č. 4-8: Osobní dávkový ekvivalent  $H_p(0.07)$  sledovaných pracovníků v jednotlivých měsících stanovený z ED DMC 2000 XB.

Je-li osobní dozimetr správně kalibrován ve veličině  $H_p(10)$ , potom naměřená hodnota odezvy osobního dozimetru interpretovaná ve veličině  $H_p(10)$  je konzervativním odhadem efektivní dávky  $E$ , a je-li osobní dozimetr správně kalibrován ve veličině  $H_p(0.07)$ , potom naměřená hodnota odezvy osobního dozimetru interpretovaná ve veličině  $H_p(0.07)$  je konzervativním odhadem ekvivalentní dávky  $H_t$  na kůži [38], [37] a [41]. (Z veličin  $H_p(10)$ ,  $H_p(0.07)$  a stanovené energie záření se vypočítá efektivní dávka  $E$ , ekvivalentní dávka  $H_t$  na kůži. Jelikož z elektronických dozimetrů nelze stanovit energii záření, byl pro výpočet  $E$  a  $H_t$  použit konzervativní odhad, jak je uvedeno v doporučení [37] a [38]).

Stejně jako v případě filmových dozimetrů byly z výsledných naměřených hodnot elektronické dozimetrie podle doporučení [37] a [38] stanoveny individuální efektivní dávky  $E$  pracovníků podle vztahu (5), individuální ekvivalentní dávky  $H_t$  na kůži podle vztahu (6) a kolektivní dávka  $S$  vybrané skupiny defektoskopických pracovníků podle vztahu (4).



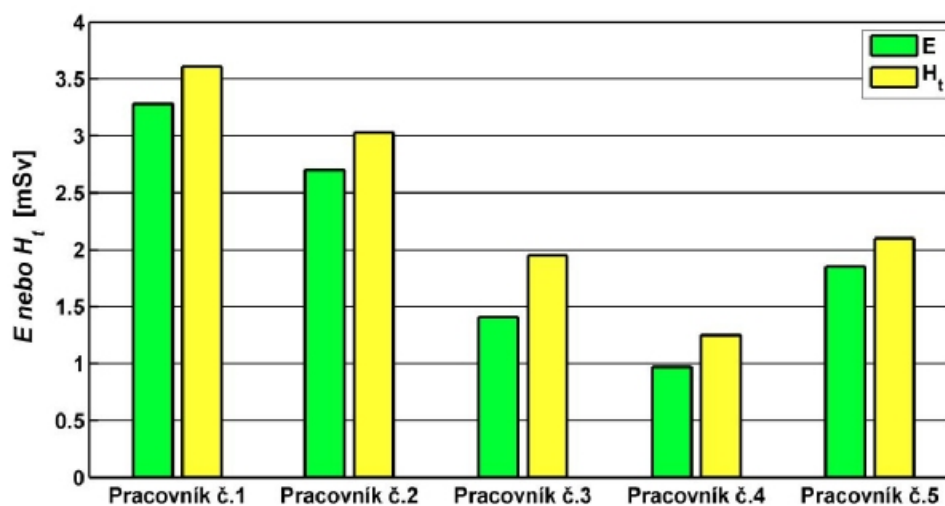
$$E = \sum_{i=1}^6 (H_p(10))_i \quad (5),$$

$$H_t = \sum_{i=1}^6 (H_p(0.07))_i \quad (6).$$

Statisticky zpracované hodnoty z elektronické dozimetrie uvádí níže uvedená tabulka 4-7 a obrázek č. 4-9.

Tabulka 4-7: Výsledné hodnoty osobního monitorování defektoskopických pracovníků z ED DMC 2000 XB.

ED	Období	$\Sigma H_p(10)$ [mSv]	$\Sigma H_p(0.07)$ [mSv]	E [mSv]	$H_t$ [mSv]	S [mSv]
1	říjen 07 – březen 08	3,28	3,61	3,28	3,61	10,21
2	říjen 07 – březen 08	2,70	3,03	2,70	3,03	
3	říjen 07 – březen 08	1,41	1,95	1,41	1,95	
4	říjen 07 – březen 08	0,97	1,25	0,97	1,25	
5	říjen 07 – březen 08	1,85	2,10	1,85	2,10	



Obrázek č. 4-9: Vypočítané efektivní dávky E a ekvivalentní dávky  $H_t$  v šestiměsíčním období z ED.

## 5. Diskuze

V následujících odstavcích je diskutována dávková a energetická závislost odezvy elektronického dozimetru DMC 2000 XB a dále jsou porovnány údaje filmových a elektronických dozimetrů získané při monitorování pracovníků v defektoskopické firmě Kulle a zpracované statistickými metodami.

### 5.1 Dávková a energetická závislost ED

#### Dávková závislost ED

Elektronické dozimetry DMC 2000 XB umístěné na fantomu PMMA (30x30x15 cm<sup>3</sup>) byly ozářeny referenčními dávkami 1 mSv, 5 mSv, 10 mSv, 50 mSv, 100 mSv a 500 mSv. Z naměřených odezvy ED byly vypočítány průměrné odezvy dozimetru (**P**), směrodatné odchylky (**s**) a odchylky naměřené odezvy od referenční odezvy (**δ**), tabulka 4-1.

Z tabulky 4-1 je vidět, že při hodnotách referenčních dávek do 10 mSv, je odchylka  $\delta \leq 11 \%$ . S rostoucí referenční dávkou roste i odchylka  $\delta$ , při ozáření referenční dávkou 50 mSv je odchylka odezvy dozimetru od této referenční dávky  $\delta \leq 15 \%$  a při ozáření referenčními dávkami 100 mSv a 500 mSv je  $\delta \leq 23 \%$ .

Měřením se ukázalo, že dávková závislost odezvy ED DMC 2000 XB k záření gama je lineární v oblasti dávek do 10 mSv ( $\delta \leq 11 \%$ ), obrázek č. 4-1.

#### Energetická závislost ED

Tabulka 4-5 udává výsledky měření energetické závislosti ED DMC 2000 XB ve svazcích rentgenového záření a záření gama. K měření odezvy ED byly použity efektivních energií v rozsahu 16 keV – 667 keV. Průběh energetické závislosti odezvy

ED je znázorněn v grafech na obrázcích č. 4-2 a 4-3. Do grafů spolu s naměřenými hodnotami odezvy ED byly vyneseny hodnoty odezvy ED udávané výrobcem [17]. Velký rozptyl naměřených hodnot můžeme pozorovat zejména v oblasti nízkých energií (16 keV), v oblasti vyšších energií je rozdíl mezi naměřenou hodnotou odezvy ED v ČMI – IIZ a hodnotou odezvy udávanou výrobcem  $\leq \pm 20\%$ .

Naměřená energetická závislost odezvy ED splňuje požadavky normy [34]: „*Relativní odezva v závislosti na energii a směru dopadu záření pro fotonové záření ve jmenovitém rozsahu použití musí být v intervalu 0,71 až 1,67. Minimální rozsah použití zahrnuje energie od 80 keV do 1,5 MeV nebo od 20 keV do 150 keV a úhly dopadu záření od 0° do 60°.*“

### **Energetická závislost odezvy FD a ED na fotonové záření**

Energetická závislost odezvy filmového dozimetru Foma PMF na fotonové záření v rozsahu energií 15 keV - 5 MeV je  $\leq \pm 10\%$ , [20].

Výrobci elektronického dozimetru DMC 2000 XB [17] udávají, že energetická závislost odezvy dozimetru na fotonové záření v rozsahu energií 20 keV - 3 MeV je  $\leq \pm 30\%$ , což bylo prokázáno také měřením v ČMI – IIZ, obrázky č. 4-2 a 4-3.

Tímto zjištěním byla vyvrácena hypotéza: „*Výrobci elektronických dozimetrů (např. MGP Instruments SA) a filmových dozimetrů udávají, že energetická závislost odezvy obou typů dozimetrických systémů k fotonovému záření je shodná.*“

## **5.2 Odezva ED k různým druhům IZ**

Tabulka 4-6 shrnuje výsledné měsíční individuální dávkové ekvivalenty  $H_p(10)$  a  $H_p(0.07)$  sledovaných defektoskopických pracovníků získaných z filmové a elektronické dozimetrie.

V případě filmové dozimetrie byly naměřené hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  téměř totožné s hodnotami  $H_p(0.07)$ . Výsledky z elektronické

dozimetrie naopak ukazují, že hodnoty  $H_p(10)$  jsou v celém monitorovacím období téměř ve všech případech nižší než hodnoty  $H_p(0.07)$ .

Pro ověření výše uvedených výsledků byla změřena odezva elektronického dozimetru DMC 2000 XB na záření  $\beta$  ze zdroje  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  (tabulka 4-2) a na fotonové záření ze zdrojů  $^{192}\text{Ir}$  a  $^{75}\text{Se}$  (tabulka 4-3 a 4-4). Potvrdilo se, že hodnota osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(0.07)$  je opravdu vyšší než hodnota  $H_p(10)$ .

Po změření odezvy elektronického dozimetru na záření gama ze zdrojů  $^{192}\text{Ir}$  a  $^{75}\text{Se}$  se ukázalo, že hodnota  $H_p(0.07)$  je vyšší než hodnota  $H_p(10)$ , přestože se jedná o silně pronikavé záření gama. V případě odezvy DMC 2000 XB na záření ze zdroje  $^{75}\text{Se}$  se hodnota  $H_p(0.07)$  od hodnoty  $H_p(10)$  v průměru liší o 10%. Při měření odezvy od nízkoenergetického zdroje záření gama  $^{192}\text{Ir}$  se hodnota  $H_p(0.07)$  od hodnoty  $H_p(10)$  průměrně liší o 15%.

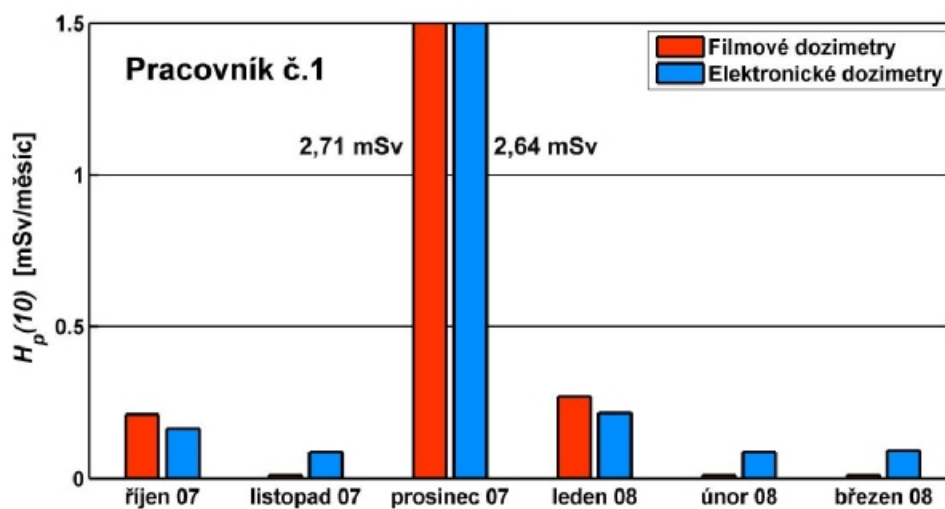
Výsledky měření potvrzují, že hranice mezi silně a slabě pronikavým zářením není ostrá.

### **5.3 Porovnání $H_p(10)$ z FD a ED**

Ve sledovaném období (říjen 2007 – březen 2008) pracovníci v defektoskopické firmě Kulle používali pro nedestruktivní testování materiálu zdroje ionizujícího záření  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{75}\text{Se}$  a zdroj rentgenového záření s pracovním napětím 160 kV, 225 kV a 400 kV. Výsledné naměřené hodnoty měsíčních individuálních osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$  a  $H_p(0.07)$  z ED spadaly do lineární části dávkové i energetické závislosti, tj.  $\delta \leq \pm 10\%$ , tudíž nebylo nutné výsledky naměřených odezev z ED korigovat na tyto závislosti.

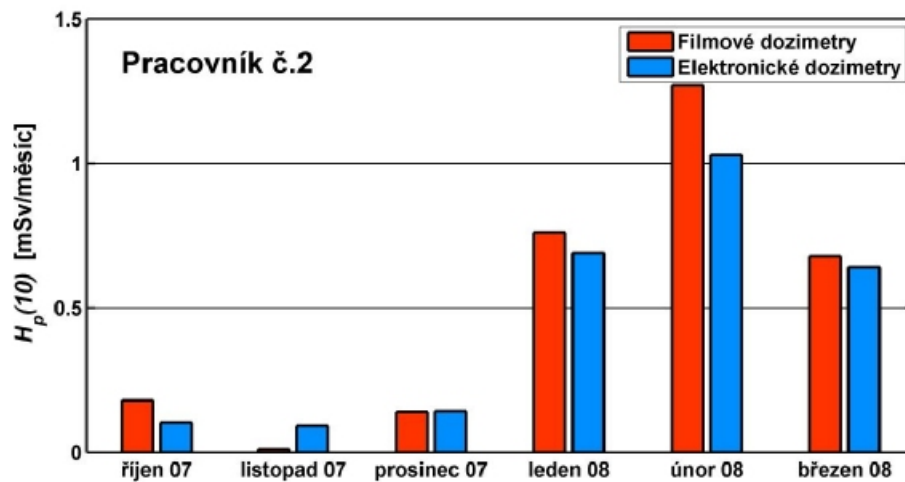
Následující obrázky č. 5-1 – 5-5 znázorňují výsledné porovnání měsíčních osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$  u sledovaných defektoskopických pracovníků při různých pracovních činnostech, které byly uvedeny výše v tabulce 4-6.

Obrázek č. 5-1 ukazuje, že pracovník č. 1 ve sledovaném období (říjen 2007 – březen 2008) obdržel během své pracovní činnosti nejvyšší dávku (2,71 mSv) v prosinci. V listopadu, únoru a březnu jsou hodnoty z filmového dozimetru menší než minimální detekovatelná hodnota, tj.  $< 0,05$  mSv. Jelikož jsou hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  z elektronického dozimetru v těchto měsících také velmi nízké (0,09 mSv), na úrovni přírodního pozadí, je možné usoudit, že pracovník v těchto měsících, oproti měsíci říjen, prosinec, leden, pracoval se ZIZ jen minimálně.



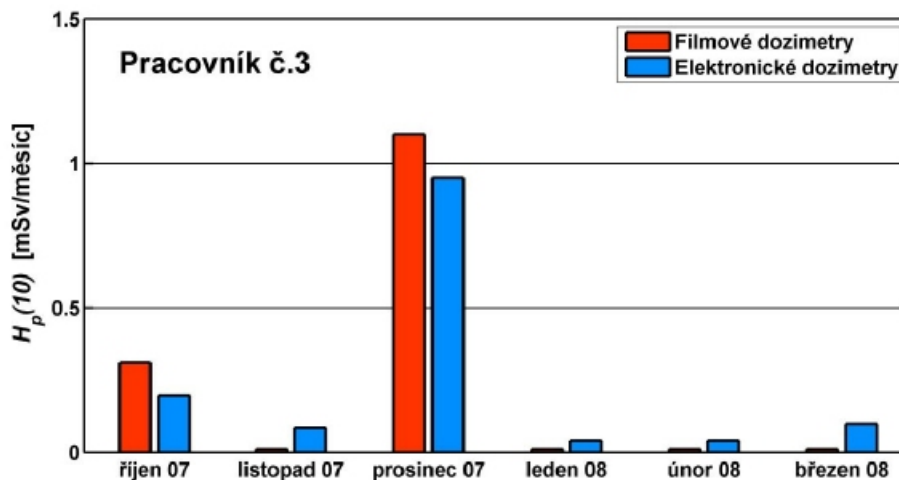
Obrázek č. 5-1: Porovnání měsíčních  $H_p(10)$  z FD a ED, pracovník č. 1.

Pracovník č. 2 (obrázek č. 5-2) v první polovině sledovaného období obdržel výrazně nižší dávky (0,14 – 0,18 mSv) než ve druhé polovině sledovaného období (0,68 – 1,27 mSv). Nejvyšší hodnota osobního dávkového ekvivalentu u pracovníka č. 2 je v únoru (1,27 mSv). V listopadu je hodnota  $H_p(10)$  z filmového dozimetru nižší než 0,05 mSv.



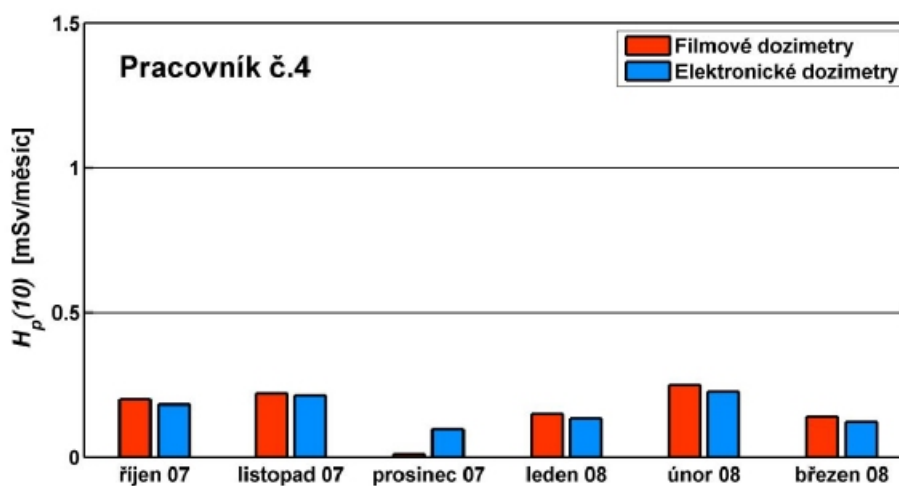
Obrázek č. 5-2: Porovnání měsíčních  $H_p(10)$  z FD a ED, pracovník č. 2.

Z obrázku č. 5-3 je vidět, že pracovník č. 3 obdržel během své pracovní činnosti nejvyšší dávku z celého sledovaného období v prosinci (1,10 mSv). V listopadu, lednu, únoru, březnu jsou hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  z filmového dozimetru nižší než hodnota 0,05 mSv a z elektronického dozimetru se hodnoty  $H_p(10)$  pohybují v rozmezí 0,04 – 0,19 mSv, které odpovídají hodnotám přírodního pozadí.



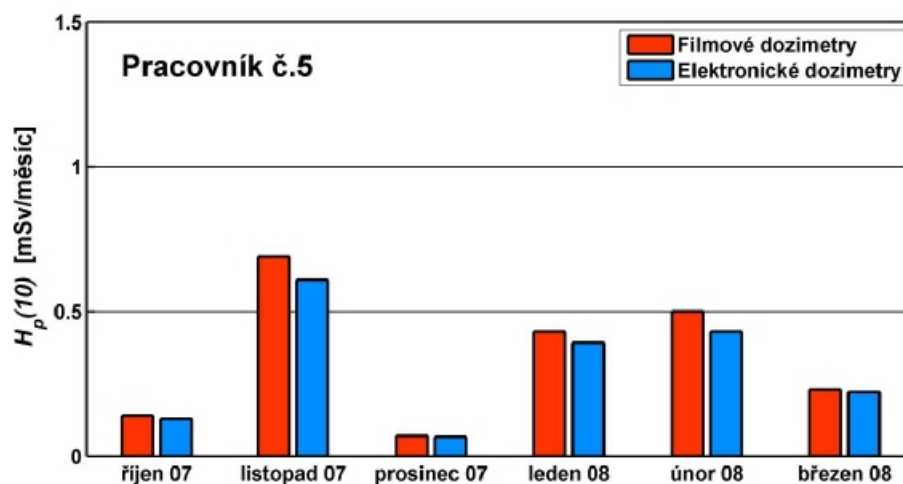
Obrázek č. 5-3: Porovnání měsíčních  $H_p(10)$  z FD a ED, pracovník č. 3.

V celém sledovaném období obdržel pracovník č. 4 (obrázek č. 5-4) velmi nízké dávky během své pracovní činnosti. Hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  jsou pod hranicí 0,25 mSv, která odpovídá hodnotě přírodního pozadí. Je tedy zřejmé, že pracovník č. 4 v celém monitorovacím období pracoval minimálně se ZIZ.



Obrázek č. 5-4: Porovnání měsíčních  $H_p(10)$  z FD a ED, pracovník č. 4.

Pracovník č. 5 (obrázek č. 5-5) během své pracovní činnosti obdržel ve sledovaném období nejvyšší dávku (0,69 mSv) v listopadu, vyšší dávky dále v lednu (0,43 mSv) a únoru (0,50 mSv). V ostatních měsících jsou hodnoty osobního dávkového ekvivalentu nízké (0,07 – 0,23 mSv). U pracovníka č. 5 hodnoty z filmového dozimetru jsou ve všech měsících vyšší než hodnoty z elektronického dozimetru.



Obrázek č. 5-5: Porovnání měsíčních  $H_p(10)$  z FD a ED, pracovník č. 5.

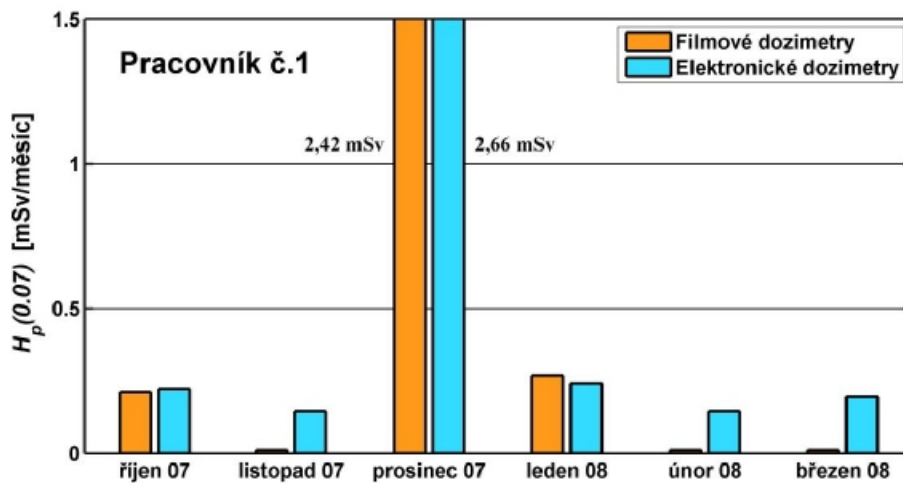
#### 5.4 Porovnání $H_p(0.07)$ z FD a ED

Obrázky č. 5-6 – 5-10 znázorňují výsledné porovnání měsíčních osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(0.07)$  jednotlivých defektoskopických pracovníků měřených filmovými a elektronickými dozimetry.

Z obrázku č. 5-6 je vidět, že pracovník č. 1 ve sledovaném období (říjen 2007 – březen 2008) obdržel během své pracovní činnosti nejvyšší dávku (2,66 mSv) v prosinci. Stejně jako v případě výsledných hodnot osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(10)$  jsou v listopadu, únoru a březnu hodnoty z filmového dozimetru nižší než minimální detekovatelná hodnota 0,05 mSv. Je tedy zřejmé, že pracovník v těchto

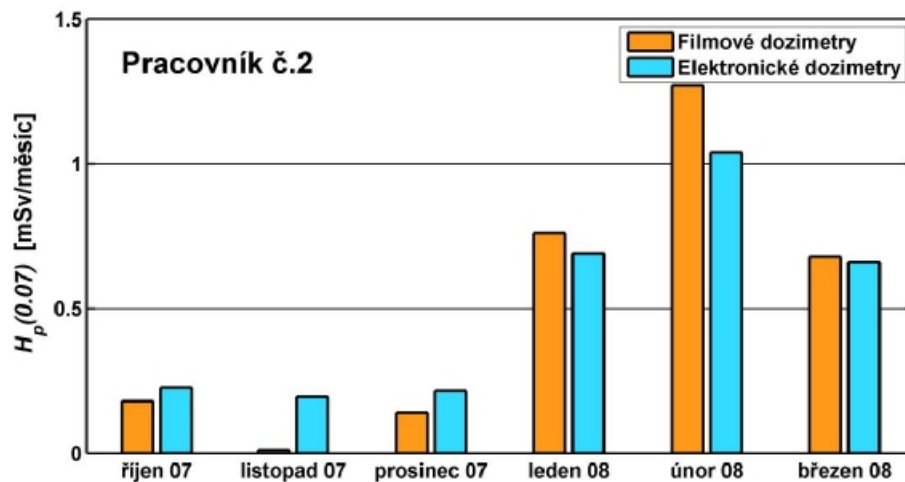


měsících pracoval minimálně se zdroji ionizujícího záření. Výsledné hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(0.07)$  z elektronického dozimetru v těchto měsících se pohybují v rozmezí 0,15 - 0,19 mSv, které odpovídají hodnotám přírodního pozadí.



Obrázek č. 5-6: Porovnání měsíčních  $H_p(0.07)$  z FD a ED, pracovník č. 1.

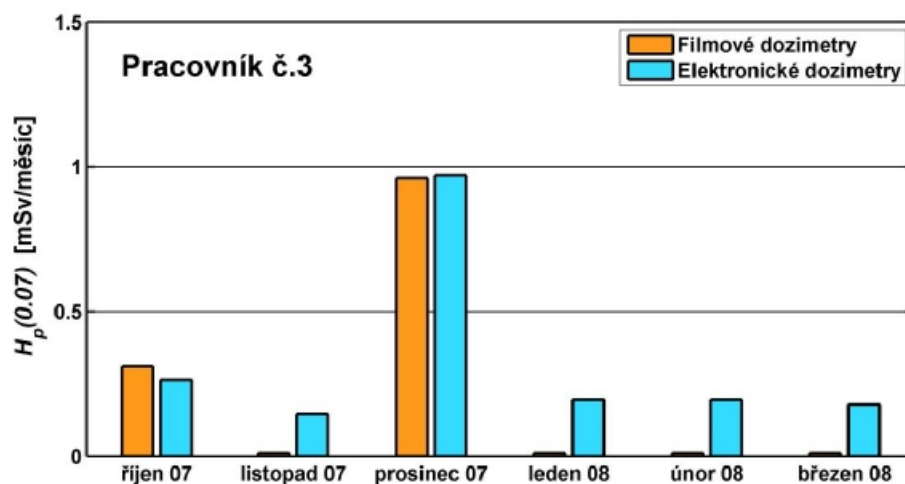
Měsíční hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(0.07)$  u pracovníka č. 2 (obrázek č. 5-7) v první polovině sledovaného období jsou nižší (0,14 – 0,23 mSv) než ve druhé polovině sledovaného období (0,66 – 1,27 mSv). Nejvyšší hodnota osobního dávkového ekvivalentu u pracovníka č. 2 je v únoru (1,27 mSv).



Obrázek č. 5-7: Porovnání měsíčních  $H_p(0.07)$  z FD a ED, pracovník č. 2.

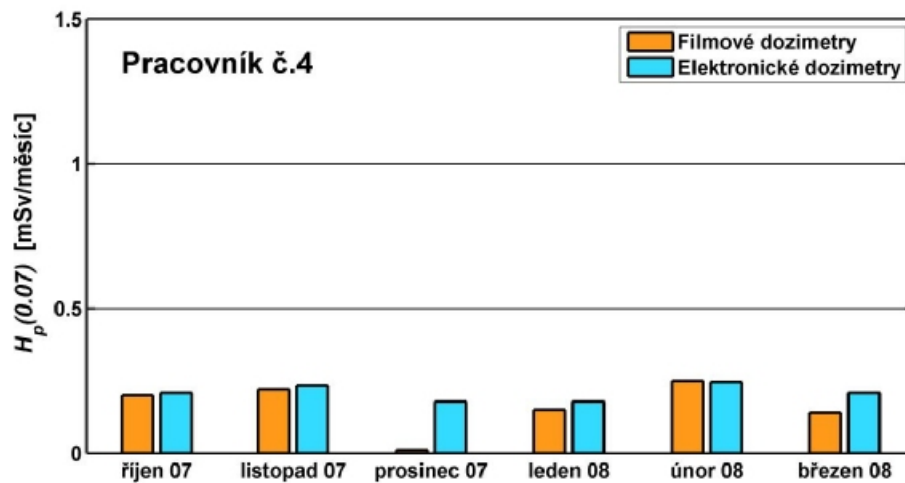
Z obrázku č. 5-8 je zřejmé, že pracovník č. 3 obdržel během své pracovní činnosti nejvyšší dávku z celého sledovaného období (0,97 mSv) v prosinci.

V listopadu, lednu, únoru a březnu hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(0.07)$  z filmového dozimetru a z elektronického dozimetru velmi nízké na úrovni přírodního pozadí.



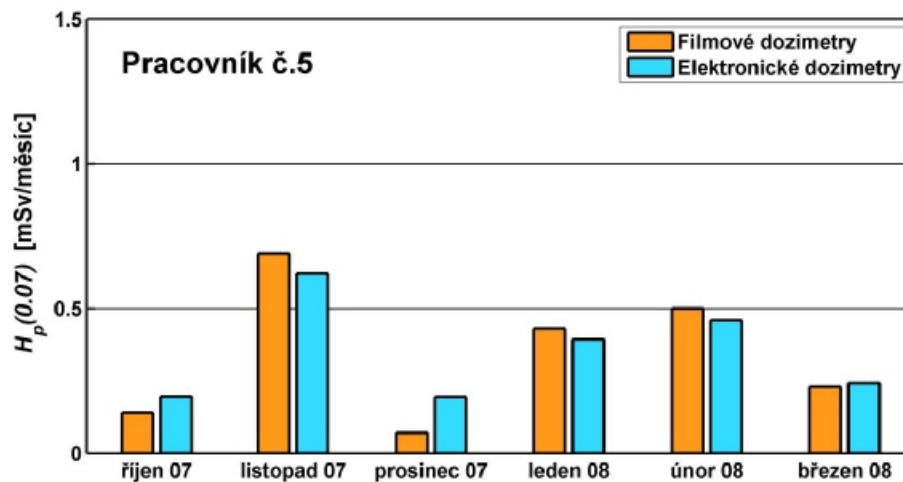
Obrázek č. 5-8: Porovnání měsíčních  $H_p(0.07)$  z FD a ED, pracovník č. 3.

V celém sledovaném období obdržel pracovník č. 4 (obrázek č. 5-9) velmi nízké dávky během své pracovní činnosti. V celém sledovaném období jsou hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(0.07)$  nižší než 0,25 mSv.



Obrázek č. 5-9: Porovnání měsíčních  $H_p(0.07)$  z FD a ED, pracovník č. 4.

Pracovník č. 5 (obrázek č. 5-10) během své pracovní činnosti obdržel ve sledovaném období nejvyšší dávku (0,69 mSv) v listopadu, vyšší dávky také v lednu (0,43 mSv) a únoru (0,50 mSv). V ostatních měsících jsou hodnoty osobního dávkového ekvivalentu nízké (0,07 – 0,23 mSv).



Obrázek č. 5-10: Porovnání měsíčních  $H_p(0.07)$  z FD a ED, pracovník č. 5.

Výsledné porovnání hodnot měsíčních osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$  a  $H_p(0.07)$ , znázorněné na obrázcích 5-1 – 5-10, potvrdilo poměrně dobrou shodu mezi hodnotami dávek naměřených filmovými a elektronickými dozimetry.

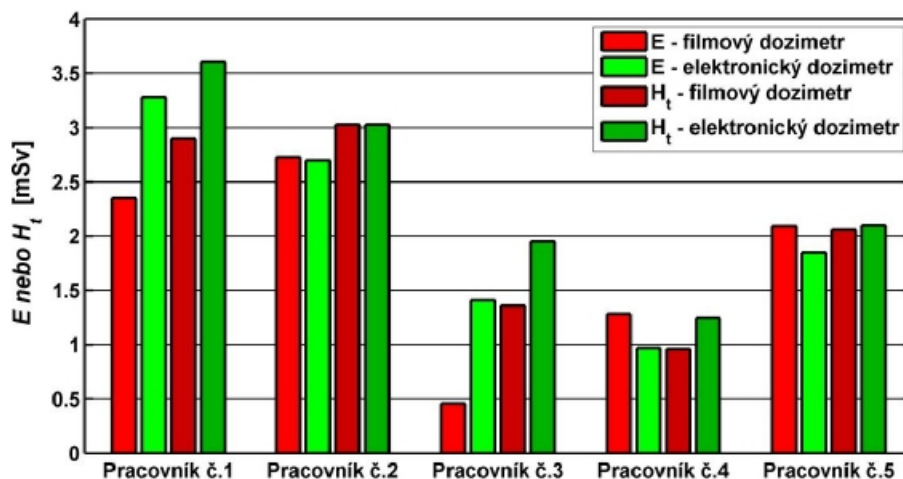
Velmi nízké hodnoty osobních dávkových ekvivalentů, v některých měsících u sledované skupiny pracovníků, odpovídají hodnotám přírodního pozadí. Lze tedy usoudit, že pracovníci v těchto měsících pracovali se ZIZ minimálně.

Nejistota stanovení veličiny osobní dávkový ekvivalent pro rozsah dávek, které obdrželi defektoskopičtí pracovníci, se pohybuje přibližně na úrovni  $\pm 25\%$  u filmových dozimetrů [18] a  $\pm 20\%$  u elektronických dozimetrů [13]. Rozdíl naměřených hodnot lze těmito nejistotami vysvětlit.

### 5.5 Porovnání vypočtených $E$ , $H_t$ a $S$ z FD a ED

Z naměřených hodnot osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$ ,  $H_p(0.07)$  byly vypočítány ze vztahů (2) – (6) hodnoty efektivní dávky  $E$ , ekvivalentní dávky  $H_t$

na kůži pro jednotlivé pracovníky v šestiměsíčním monitorovacím období z filmové a elektronické dozimetrie (obrázek č. 5-11). Pomocí vztahu (4) byla stanovena kolektivní dávka  $S$  vybrané skupiny defektoskopických pracovníků za šestiměsíční monitorovací období.



Obrázek č. 5-11: Porovnání vypočtených efektivních  $E$  a ekvivalentních  $H_t$  dávek v šestiměsíčním období z FD a ED.

Z výše uvedeného grafu je zřejmé, že hodnoty  $E$  a  $H_t$  z filmového a elektronického dozimetru jsou u pracovníků č. 2, 4 a 5 v dobré shodě.

U pracovníka č. 1 v listopadu, únoru a březnu jsou hodnoty osobních dávkových ekvivalentů z filmového dozimetru nižší než minimální detekovatelná hodnota 0,05 mSv. Elektronickým dozimetrem byly v těchto měsících naměřeny hodnoty vyšší, v rozsahu 0,09 – 0,19 mSv. Proto je výsledná hodnota  $E$  a  $H_t$  za celé monitorovací období z elektronického dozimetru u pracovníka č. 1 vyšší než v případě filmového dozimetru.

Situace je obdobná i u pracovníka č. 3, u kterého jsou hodnoty osobních dávkových ekvivalentů z filmového dozimetru v listopadu, lednu, únoru a březnu nižší než 0,05 mSv. Elektronickým dozimetrem byly v těchto měsících naměřeny hodnoty

vyšší, v rozsahu 0,04 – 0,19 mSv, tudíž i výsledná hodnota **E** a **H<sub>t</sub>** je za celé monitorovací období z elektronického dozimetru u pracovníka č. 3 vyšší než z filmového dozimetru.

Kolektivní dávka **S** vybrané skupiny pracovníků za šestiměsíční monitorovací období je z filmové dozimetrie **8,92 mSv** a z elektronické dozimetrie je **10,21 mSv**. Kolektivní dávka z elektronické dozimetrie je vyšší, jelikož efektivní dávka z elektronické dozimetrie ve většině měsíců, z celého sledovaného období, také vyšší.

### **5.6 Měření osobních dávek při různých pracovních činnostech se ZIZ**

Pracovníci v defektoskopické firmě Kulle používají k nedestruktivnímu testování materiálů zdroje ionizujícího záření: <sup>192</sup>Ir, <sup>75</sup>Se, RTG lampy 160 kV, 225 kV a 400 kV. Za celé sledované šestiměsíční období defektoskopičtí pracovníci obdrželi dávky v rozsahu 0,04 – 2,71 mSv. Tyto hodnoty osobních dávek jsou pod hranicí limitů ozáření pro pracovníky se ZIZ a tudíž stanovená hypotéza: „*Při defektoskopických pracích se používají různé druhy ionizujícího záření (neutrony, záření gama, lineární urychlovače) o širokém rozsahu dávkových příkonů, proto je zde reálná možnost, že pracovníci mohou obdržet vyšší dávky, než stanovují limity*“ nebyla potvrzena během celého monitorovacího období.

## 5.7 *Vyhodnocení výhod a nevýhod FD a ED*

### **Filmový dozimetr**

*Výhody filmového dozimetru* [2], [18], [6]:

- trvalá hodnota záznamu o dávce,
- určení druhu a energie záření a směru ozáření,
- možnost automatizace odečtu optických hustot a výpočtu dávek,
- snadná identifikace filmu,
- nízká cena.

*Nevýhody filmového dozimetru* [2], [6]:

- poměrně vysoký fading (ubývání odezvy po ukončení ozařování),
- nelze překrýt celý potřebný dávkový rozsah jedním filmem,
- směrovou závislost lze kompenzovat jen do určité míry,
- citlivost na vnější vlivy: vlhkost, teplota, chemické látky
- omezení možnosti měření jiných druhů záření než fotonového,
- nízká přesnost v oblastech velmi vysokých a velmi nízkých dávek.

### **Elektronický dozimetr**

*Výhody elektronických osobních dozimetrů* [9], [10]:

- okamžitá informace o dávce, dávkovém příkonu, dávkovém profilu,
- okamžitý přehled o vývoji osobního ozáření,
- nastavení alarmů pro kumulovanou dávku a dávkový příkon,
- stanovení radiační zátěže pro jednotlivé činnosti v kontrolovaném pásmu, na jednotlivých zařízeních a objektech,
- zobrazení čerpané dávky od počátku sledovaného období a dávek za roční i pětileté období,

- optimalizace radiační zátěže prostřednictvím průběžného sledování aktuálního čerpání dávek jednotlivými pracovníky při realizaci naplánovaných činností,
- zamezení vstupu do kontrolovaného pásma při překročení osobního limitu,
- softwarové provedení kontroly prahů alarmů  $H_p(10)$  a  $H_p(0,07)$ ,
- softwarové zpracování dat z dozimetru.

*Nevýhody elektronických osobních dozimetrů [9], [10]:*

- vliv vysokofrekvenčních elektromagnetických polí na odezvu dozimetru,
- cena,
- snazší mechanické poškození,
- baterie.

V České republice se jako primární metoda monitorování zevního ozáření pracovníků se ZIZ používá filmová dozimetrie. Na rozdíl od jiných dozimetrických systémů je vývoj filmu jako dozimetru prakticky uzavřen. Mezi jeho hlavní výhody patří trvalá hodnota záznamu o dávce, přibližné určení druhu a energie záření a směru ozáření, nízká cena. Na druhou stranu má i řadu nevýhod, nelze překrýt celý potřebný dávkový rozsah jedním filmem, kompenzace směrové závislosti jen do určité míry, nízká přesnost v oblastech velmi nízkých a vysokých dávek, možnost poškození při nízkých teplotách, atd.

Prostředky elektronické osobní dozimetrie jsou určeny k operativnímu vyhodnocování radiační zátěže pracovníků se ZIZ ze zevního ozáření. Elektronická osobní dozimetrie je perspektivní metodou jak z hlediska vysoké citlivosti, tak z hlediska operativnosti. Jejich nespornou výhodou je okamžitá odezva, okamžitý přístup k hodnotám obdržené dávky při pobytu pracovníků na pracovišti se ZIZ umožňující provedení případných ochranných opatření. Nastavení alarmu dávky a dávkových příkonů, možnost spojení hodnot obdržené dávky s příslušnou radiační



činností. Nevýhodou elektronických dozimetrů je bezesporu jejich vysoká cena. Snazší mechanické poškození a u starších typů vliv vysokofrekvenčních elektromagnetických polí na odezvu dozimetru patří k dalším nevýhodám elektronických dozimetrů.

Při vyhodnocování odezev těchto dvou dozimetrických systémů lze také nalézt rozdíly. U filmových dozimetrů je možné vyhodnocení skupiny dozimetrů najednou, tj. včetně etalonů, z tohoto důvodu tedy lze korigovat dávkovou, směrovou a energetickou závislost nezávisle na znalosti spektra IZ. Elektronické dozimetry (speciálně typ DMC 2000 XB) lze vyhodnocovat pomocí čtečky pouze po jednom kuse a z hlediska přesnosti měření je vhodnější použití ED v lineární části dávkové a energetické závislosti jejich odezvy k IZ nebo při znalosti spektra IZ je možné, za použití matematických korekcí, určit výslednou odezvu dozimetru.

## 6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo porovnání údajů elektronických dozimetrů DMC 2000 XB společně s dosud používanými filmovými dozimetry na defektoskopickém pracovišti firmy Kulle PK-Q, Na Pokraji 2/540, Praha 9 - Prosek, pořízených při různých pracovních činnostech.

Elektronické dozimetry DMC 2000 XB byly před zavedením do osobního monitorovacího systému defektoskopických pracovníků na výše uvedeném pracovišti ověřeny v Českém metrologickém institutu v Praze. Během ověření byla změřena u ED dávková závislost jejich odezvy k záření gama z radionuklidového zdroje  $^{137}\text{Cs}$  a energetická závislosti odezvy ED ve svazcích rentgenového záření a záření gama ze zdroje  $^{137}\text{Cs}$ . Měřením se ukázalo, že dávková závislost odezvy ED DMC 2000 XB k záření gama je lineární v oblasti dávek do 10 mSv ( $\delta \leq 11\%$ ).

U energetické závislosti byl pozorován velký rozptyl naměřených hodnot v oblasti nízkých energií (16 keV). Pokud by se tedy v defektoskopické firmě k prozařování tenkých materiálů používalo rentgenové záření s nízkými energiemi 8 – 16 keV, bude u ED naměřena odezva s vyšší chybou.

Během šestiměsíčního osobního monitorování vybrané skupiny defektoskopických pracovníků byla zjištěna poměrně dobrá shoda mezi naměřenými hodnotami osobních dávkových ekvivalentů  $H_p(10)$  a  $H_p(0.07)$  z filmové a elektronické dozimetrie.

V případě monitorování osobních dávek defektoskopických pracovníků pomocí elektronických dozimetrů bylo zjištěno, že hodnoty osobního dávkového ekvivalentu  $H_p(0.07)$  jsou vyšší než hodnoty  $H_p(10)$  v celém sledovaném období. Z tohoto důvodu bylo provedeno kontrolní měření odezvy elektronických dozimetrů DMC 2000 XB k záření gama od zdrojů  $^{75}\text{Se}$  a  $^{192}\text{Ir}$ . Toto měření potvrdilo, že hranice mezi silně a slabě pronikavým zářením není ostrá.

Dále bylo prokázáno, že obě stanovené hypotézy:

1. *„Výrobci elektronických dozimetrů (např. MGP Instruments SA) a filmových dozimetrů udávají, že energetická závislost odezvy obou typů dozimetrických systémů na fotonové záření je shodná.“*
2. *„Při defektoskopických pracích se používají různé druhy ionizujícího záření (neutrony, záření gama, brzdné záření generované na lineárních urychlovačích) o širokém rozsahu dávkových příkonů, proto je zde reálná možnost, že pracovníci mohou obdržet vyšší dávky, než stanovují limity.“*

nebyly ze zjištěných skutečností potvrzeny.

U hypotézy č. 1 (kapitola 5.1) bylo zjištěno, že energetická závislost odezvy filmového dozimetru Foma PMF na fotonové záření v rozsahu energií 15 keV - 5 MeV je  $\leq \pm 10 \%$ , [20]. U elektronických dozimetrů DMC 2000 XB [17] výrobci udávají, že energetická závislost odezvy dozimetru na fotonové záření v rozsahu energií 20 keV - 3 MeV je  $\leq \pm 30 \%$ , což bylo prokázáno také měřením v ČMI – IIZ.

Hypotéza č. 2 (kapitola č. 5.6) za celé šestiměsíční monitorovací období nebyla potvrzena. Pracovníci ve sledovaném období během svých běžných pracovních činností obdrželi dávky pod hranici limitů pracovníků se ZIZ.

Na základě výsledků z osobního monitorování zevního ozáření defektoskopických pracovníků z filmové a elektronické dozimetrie a po uvážení výhod a nevýhod těchto dvou dozimetrických systémů, je možné říci, že na defektoskopickém pracovišti firmy Kulle lze nahradit filmové dozimetry elektronickými dozimetry DMC 2000 XB.

## 7. Seznam použité literatury

### Monografie

- [1] KLENER, V. et al. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Azin, 2000. ISBN 80-238-3703-6.
- [2] MUSÍLEK, L., ŠEDA, J., TROUSIL, J. *Dozimetrie ionizujícího záření*. Praha: ČVUT, 1992. 282 s. ISBN 80-01-00812-6.
- [3] SINGER, J., *Dozimetrie ionizujícího záření*. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2005. 67 s. ISBN 80-7040-752-2.
- [4] SINGER, J. HEŘMANSKÁ, J. *Principy radiační ochrany*. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2004. 111s. ISBN 80-7040-708-5.
- [5] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST. *Radiační ochrana: Zabezpečení osobního monitorování při činnostech vedoucích k ozáření, Část I. – Zevní ozáření*. Praha: SÚJB, srpen 2003. ISBN 80-7073-089-7.
- [6] ŠEDA, J. et al. *Dozimetrie ionizujícího záření*. Praha: SNTL, 1983.
- [7] ŠEDA, J. *Základy dozimetrie*. Praha: ČVUT, 1991. 188 s. ISBN 80-01-00595.

### Časopisecké statě

- [8] ANKERHOLD, U. *Catalogue of X-ray spectra and their characteristic data - ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered X-ray spectra*, Braunschweig: 2000, vol. PTB-Dos-34.
- [9] BOLOGNESE-MILSZTAJN, T. et al. Active personal Dosimeters for individual monitoring and other new developments. *Radiation Protection dosimetry*, Oxford University Press: 2004, vol. 112, n. 1, s. 141-168. ISSN 0144-8420.
- [10] HAVRÁNKOVÁ, R., KOC, J., NAVRÁTIL, L. et al. Možnosti elektronické osobní dozimetrie na jaderné elektrárně Temelín. *Kontakt*. České Budějovice: 2005, roč. 4, č. 7, s. 200-398. ISSN 1212-4117.
- [11] REGAR, E., SIANOS, G., THURY, A. Vascular Brachytherapy. *Cardiology current perspectives*, 2000, s. 287-292. ISBN 1-85317-629-X.

- [12] SHOBE, J., SWINTH, K. Electronic Dosimetry Workshop. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 1998, s. 421-424. ISBN 0-16-009589-1.

### **Nepublikované texty**

- [13] *Electronic personal dosimeter DMC 2000X/S/XB*, user's guide. MGP Instruments SA France: Lamanon, 2006.
- [14] *Multi-purpose Survey Meter RDS 110*, user's guide. RADOS Technology, 2002.
- [15] *Ověřovací list*. ČMI-IIZ, 2008.

### **Elektronický zdroj**

- [16] *Centrální registr profesionálních ozáření*. [online], [cit. 2007-29-08]. Dostupné na: <[http://www.sujb.cz/?c\\_id=707](http://www.sujb.cz/?c_id=707)>.
- [17] *Electronic Dosimeters MGP DMC 2000 XB*. [online], [cit. 2007-29-08]. Dostupné na: <<http://www.arrowtechinc.com/dmc%202000xb.htm>>.
- [18] *Filmový dozimetr CSOD*. [online], [cit. 2008-03-02]. Dostupné na: <[http://www.csod.cz/index\\_soubory/Page1036.htm](http://www.csod.cz/index_soubory/Page1036.htm)>.
- [19] Osobní monitorování filmovými dozimetry. [online], [cit. 2008-03-01]. Dostupné na: <[http://www.gypy.sk/zoe/www%20full%20version%2027/pok1/osobni\\_dozimetrie.html](http://www.gypy.sk/zoe/www%20full%20version%2027/pok1/osobni_dozimetrie.html)>.
- [20] *Personal Monitoring Film*. [online], [cit. 2008-18-04]. Dostupné na: <<http://www.foma.cz/foma/dokumenty/RadioDownload.asp>>.
- [21] *Podmínky pro poskytování služby osobní dozimetrie CSOD - filmová dozimetrie*. [online], [cit. 2008-03-02]. Dostupné a: <[http://www.csod.cz/index\\_soubory/fd.pdf](http://www.csod.cz/index_soubory/fd.pdf)>.
- [22] Provádění NDT Zkoušek. [online], [cit. 2008-23-04]. Dostupné na: <[http://www.atg.cz/?adresa=zkousky\\_ndt](http://www.atg.cz/?adresa=zkousky_ndt)>.
- [23] *Radionuclide safety data sheet - <sup>75</sup>Se*. [online], [cit. 2008-23-04]. Dostupné na: <<http://www.stanford.edu/dept/EHS/prod/researchlab/radlaser/RSDS.html>>.
- [24] *Radionuclide safety data sheet - <sup>192</sup>Ir*. [online], [cit. 2008-23-04]. Dostupné na: <<http://www.stanford.edu/dept/EHS/prod/researchlab/radlaser/RSDS.html>>.

## Legislativa

- [25] Vyhláška č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně v platném znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.
- [26] Vyhláška č. 184/1997 Sb. o požadavcích na zajištění radiační ochrany.
- [27] Zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (Atomový zákon) v platném znění zákona č. 13/2002 Sb.
- [28] Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii.

## Normy

- [29] **ČSN 40 4302:** Uzavřené radionuklidové zariadenie – stupně odolnosti a metody zkoušení. UPNM 1985.
- [30] **ČSN 25 9108:** Zařízení dopravní a pro manipulaci s radioaktivním materiálem. UPNM 1993.
- [31] **EEC 89/336:** The approximation of the laws of the Member States relative to Electromagnetic Compatibility. DIRECTORATE-GENERAL III INDUSTRY 1989.
- [32] **EEC 73/23:** Electrical Equipment Designed for Use within Certain Voltage Limits. DIRECTORATE-GENERAL III INDUSTRY 1997.
- [33] **IAEA 1999:** Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation, Safety Standard Series, No. RS-G -1.3, IAEA, Vienna, 1999.
- [34] **IEC 61526:** Radiation protection Instrumentation – Measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0.07) for X, gamma, neutron and beta radiations – Direct reading personal dose equivalent meters and monitors. IEC 2005.
- [35] **ICRP 75:** General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP Publications 75, Oxford, Pergamon Press 1982.
- [36] **ICRP 60:** Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publications 60, Oxford, Pergamon Press 1990.
- [37] **ICRP 74:** Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publications, Oxford, Pergamon Press 1996.
- [38] **ICRU 57:** Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRU Publications, Oxford, Pergamon Press 1998.
- [39] **ICRU 1980:** Radiation Quantities and Units. Washington D.C. 1980.
- [40] **ICRU 1993:** Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. Bethesda, ICRU 1998.

- [41] **ISO 1997:** X and Gamma Reference Radiations for Calibrating Dosimeters and Dose Ratemeters and for Determining Their Response as a function of Photon Energy, ISO 4037/ Part. 1. Characteristics of the Radiations and their Methods of Production.
- [42] **ISO 1999a:** X and Gamma Reference Radiations for Calibrating Dosimeters and Dose Ratemeters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy, ISO 4037/ Part. 2. Dosimetry of X and Gamma for Radiation Protection over the Energy Range from 8 keV to 1,3 MeV. ISO Geneva (1999).
- [43] **ISO 1999b:** X and Gamma Radiations for Calibrating Dosimeters and Dose Ratemeters and for Determining Their Response as a Function of Photon Energy, ISO 4037/ Part. 3. Reference Photon Radiations: Calibration of Area and Personal Dosimeters and the Determination of their Response as a function of Photon Energy and Angle of Incidence. ISO Geneva (1999).

## **8. Klíčová slova**

- Defektoskopie
- Elektronická osobní dozimetrie
- Filmová osobní dozimetrie
- Monitoring
- Radiační ochrana
- Radiační zátěž
- Zevní ozáření