

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Systém elektronické osobní dozimetrie

Vypracovala: Irena Petrová

Vedoucí práce: Ing. Jan Singer, CSc.

2008

Abstract

The system of electronic personal dosimetry

The thesis deals with the issue of operative dosimetry, to be specific, with personal dosimetry. The objective of the thesis is to compare several parameters, such as the dose, direction and energy dependence, in two types of electronic dosimeters made by the firm Siemens (type EPD1) and by the firm MGP Instruments (type DMC 2000XB).

In the first section of my thesis the personal monitoring and related data such as quantities used to monitor external irradiation are introduced. In the next section the operative monitoring, focused mainly on electronic but also on thermoluminescent and radiophotoluminescent dosimetry, is described.

The results of the irradiation (exposure) of electronic personal dosimeters of types EPD1 and DMC 2000XB are included in the thesis and the measured values are statistically processed. The dose, direction and energy dependence of both types of these dosimeters is evaluated and put into diagrams.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Systém elektronické osobní dozimetrie vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

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

V Českých Budějovicích dne 26. května 2008

.....
Irena Petrová

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce Ing. Janu Singerovi, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Také děkuji Ing. Zdeňku Zelenkovi za rady a připomínky a Ing. Ladislavu Beránkovi za pomoc při statistickém zpracování. Oddělení Laboratoř metrologie ionizujícího záření Jaderné elektrárny Temelín a Českému metrologickému institutu děkuji za možnost provedení měření.

Obsah:

Úvod	7
1. Současný stav	8
1.1 Dozimetrie	8
1.1.1 Osobní monitorování.....	8
1.1.1.1 Monitorování zevního ozáření osob.....	8
1.1.1.2 Základní veličiny pro monitorování zevního ozáření osob.....	10
1.1.1.3 Dozimetr	12
1.2 Metody operativní osobní dozimetrie	13
1.2.1 Termoluminiscenční dozimetrie.....	13
1.2.1.1 Termoluminiscence	13
1.2.1.2 Termoluminiscenční dozimetr.....	15
1.2.1.3 Měření odezev, výpočet dávek.....	17
1.2.2 Radiofotoluminiscenční osobní dozimetrie.....	19
1.2.3 Elektronická osobní dozimetrie.....	21
1.2.3.1 Křemíková dioda	21
1.2.3.2 Parametry elektronického osobního dozimetru typu EPD1 podle firmy Siemens.....	22
1.2.3.3 Parametry elektronického osobního dozimetru typu DMC 2000XB podle firmy MGP Instruments	24
1.2.3.4 Systém elektronické osobní dozimetrie.....	25
1.2.3.5 Porovnání filmové a elektronické osobní dozimetrie	28
2. Cíle práce a hypotézy	30
3. Metodika	31
4. Výsledky	35
4.1 Dávková a směrová závislost	35
4.2 Energetická závislost	60
4.2.1 Energetická závislost dozimetru typu EPD1	60
4.2.2 Energetická závislost dozimetru typu DMC 2000XB.....	64
5. Diskuze	68
5.1 Dávková závislost.....	68
5.2 Směrová závislost.....	72
5.3 Energetická závislost	76
5.3.1 Energetická závislost dozimetru typu EPD1	76
5.3.2 Energetická závislost dozimetru typu DMC 2000XB.....	76
5.3.3 Porovnání energetických závislostí dozimetrů EDP1 a DMC 2000XB.....	77

6. Závěr	79
7. Seznam použité literatury.....	80
8. Klíčová slova	83
9. Přílohy	84

Úvod

Téma Systém elektronické osobní dozimetrie jsem si pro zpracování své diplomové práce vybrala především proto, že je velmi zajímavé a svou povinnou praxí jsem absolvovala právě na oddělení osobní dozimetrie v Jaderné elektrárně Temelín. Dozimetrie je významný obor, který má více než stoletou historii.

Člověk se jí začal zabývat po objevení ionizujícího záření. Hlavním mezníkem byl rok 1895, kdy Wilhelm Conrad Röntgen objevil paprsky X, později přejmenované na rentgenové záření. Nutnost měřit záření nastala především po zjištění jeho negativních účinků na organismus. Lidé nejsou schopni ionizující záření vnímat svými smysly, proto se jeho přítomnost a množství detekují a měří nejrůznějšími způsoby. Dozimetrie má velký význam především v oblasti radiační ochrany pro pracovníky se zdroji ionizujícího záření. Ve své práci se zabývám jednou metodou z oblasti osobní dozimetrie, kterou je elektronická osobní dozimetrie.

Nejprve práce popisuje osobní monitorování a věci, které s ním souvisí, např. veličiny používané pro monitorování zevního ozáření. Poté je část věnována operativnímu monitorování, která je zaměřena především na elektronickou, ale také na termoluminiscenční a radiofotoluminiscenční dozimetrii.

V práci jsou zahrnuty výsledky ozařování elektronických osobních dozimetrů typu EPD1 a DMC 2000XB a jsou zde statisticky zpracované získané hodnoty měření. Dále je zde zhodnocena a graficky znázorněna dávková, směrová a energetická závislost obou typů těchto osobních dozimetrů.

1. Současný stav

1.1 Dozimetrie

Slovo dozimetrie je řeckého původu, kde „dosis“ znamená dávka a „metreo“ lze přeložit jako měřit. Její úkol lze odvodit přímo z jejího názvu, zabývá se tedy měřením dávek ionizujícího záření, ale i jinými problémy, jež s ním souvisí (10).

Nutnost provádět měření je ustanovena v zákoně 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření v platném znění (Atomový zákon), který obsahuje §18, jež přikazuje, že držitel povolení je povinen sledovat, měřit, hodnotit, ověřovat a zaznamenávat veličiny, parametry a skutečnosti důležité z hlediska jaderné bezpečnosti a radiační ochrany (33).

S měřením ionizujícího záření se setkáváme při každém jeho použití nebo při použití radionuklidů, při dozimetrické kontrole při průmyslovém nebo léčebném ozařování nebo při monitorování radiační zátěže okolí. Měří se nepřímou na základě procesů, které záření vyvolá při absorpci v určité látce. Důsledek těchto procesů se následně převádí na pozorovatelné signály (2).

Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně, v platném znění (dále jen Vyhláška) obsahuje náležitosti programu monitorování. Program monitorování má 4 části: monitorování pracoviště, osobní monitorování, monitorování výpustí a monitorování okolí (17).

1.1.1 Osobní monitorování

Osobní monitorování je ve Vyhlášce definováno takto: „Osobní monitorování slouží k určení osobních dávek sledováním, měřením a hodnocením individuálního zevního i vnitřního ozáření jednotlivých osob zpravidla osobními dozimetry“ (32).

1.1.1.1 Monitorování zevního ozáření osob

Monitorováním zevního ozáření se rozumí měření dávek způsobených zdroji ionizujícího záření, které jsou vně ozářeného těla pracovníka.

Ve Vyhlášce je monitorování definováno jako: „cílené měření veličin charakterizujících ozáření, pole záření nebo radionuklidy a hodnocení výsledků těchto měření pro účely usměrňování ozáření.“ Monitorováním je pověřena oprávněná dozimetrická služba, což je osoba, která provádí odečet nebo výklad hodnot registrovaných osobními dozimetry nebo jiná hodnocení vnějšího ozáření. Provádí také měření radioaktivity v lidském těle a v biologických vzorcích nebo hodnocení vnitřního ozáření, které dovolí určit roční efektivní dávku nebo její úvazek (32).

Na pracovištích se zdroji ionizujícího záření je nutnost vymezení a označení kontrolovaného pásma (KP). Kontrolované pásmo jsou prostory, kde může dojít za běžného provozu k překročení efektivní dávky 6 mSv za rok nebo ekvivalentní dávka může být vyšší než tři desetiny limitu ozáření pro oční čočku, kůži a končetiny. Všechny osoby, jež vstupují do kontrolovaného pásma, jsou dozimetricky sledovány (9).

Práci v kontrolovaném pásmu smí vykonávat pouze osoby starší 18 let, které jsou duševně způsobilé a prokázaly odbornou způsobilost pro práci se zdroji ionizujícího záření (6).

K zajištění bezpečných pracovních podmínek z hlediska radiační ochrany před ionizujícím zářením byl zaveden monitorovací program, tedy program dozimetrické kontroly na pracovištích. Svým měřením ověřuje nepřekročení dávkových limitů. Tento program zahrnuje také hodnoty odvozených limitů a referenčních úrovní a veškerá opatření při jejich překročení (3).

Monitorování se podle typu praxe navrhuje:

- soustavné, nepřetržité (kontinuální) – musí potvrzovat, že dané pracovní podmínky zůstávají bezpečné, v souladu s požadavky povolení praxe
- pravidelné (periodické) – opakuje se v určených lhůtách a jeho cílem je rovněž potvrzovat, že dané pracovní podmínky zůstávají bezpečné v souladu s požadavky povolení praxe
- operativní - provádí se v souvislosti s určitou činností za cílem zhodnotit její bezpečnost z hlediska dávkových limitů a podmínek povolení (13)

Monitorování radiačních pracovníků má za cíl:

- a) přispět k dodržení stanovených limitů
- b) stanovit časové trendy a pravděpodobnost případného nadlimitního ozáření pro dané profese
- c) doplnit a také upřesnit vstupní informace pro výpočty potřebné k provádění optimalizačních studií
- d) poskytnout informace pro operativní rozhodování o individuálním monitorování
- e) srovnání pracovních rizik vyplývajících z činností užívajících zdroje ionizujícího záření s riziky jiných „neradiačních“ činností (12).

1.1.1.2 Základní veličiny pro monitorování zevního ozáření osob

V ochraně před zářením současná legislativa stanovuje primární limity pro veličiny efektivní dávka E a ekvivalentní dávka H_T .

Efektivní dávka „ E “

Efektivní dávka udává míru ozáření jednotlivce. Je to součet součinů váhového faktoru w_T a ekvivalentní dávky H_T ve všech orgánech a tkáních lidského těla (7).

$$E = \sum_T (w_T \cdot H_T)$$

Hodnoty váhových faktorů pro jednotlivé orgány a tkáně jsou uvedeny v tabulce č.2 přílohy č.5 Vyhlášky (32).

Jednotkou efektivní dávky je sievert [Sv].

Ekvivalentní dávka „ H_T “

Ekvivalentní dávka H_T udává míru ozáření jednotlivého orgánu nebo tkáně. Je to součet součinů radiačního váhového faktoru w_R a střední absorbované dávky $D_{T,R}$ v orgánu nebo tkáni T pro ionizující záření typu R (7).

$$H_T = \sum_R (w_R \cdot D_{T,R})$$

Hodnoty radiačních váhových faktorů w_R pro jednotlivé typy záření jsou uvedeny v tabulce č.1 přílohy č.5 Vyhlášky (32).

Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert [Sv].

Kolektivní efektivní dávka „KED“

Kolektivní efektivní dávka je součet efektivních dávek všech jednotlivců v dané skupině. Jednotkou je také sievert [Sv] (7).

Dávkový ekvivalent „H“

Je součin absorbované dávky D_T v uvažovaném bodě tkáně a jakostního činitele Q (7).

$$H = D_T \cdot Q$$

Jakostní činitel Q udává kvalitu záření z hlediska jeho biologického účinku a je uveden v tabulce č.3 přílohy č.5 Vyhlášky (32).

Osobní dávkový ekvivalent „ $H_p(d)$ “

Osobní dávkový ekvivalent $H_p(d)$ je dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla v hloubce tkáně d (10).

Touto veličinou se osobní dozimetry kalibrují proto, aby naměřené údaje odpovídaly co nejvíce veličině, v níž jsou stanoveny základní limity, tzn. efektivní dávce E nebo ekvivalentní dávce H_T .

K odhadu efektivní dávky E se užívá osobní dávkový ekvivalent „ $H_p(10)$ “. Ekvivalentní dávka H_T na kůži se odhaduje z osobního dávkového ekvivalentu „ $H_p(0,07)$ “ a pro odhad ekvivalentní dávky H_T na oči slouží osobní dávkový ekvivalent $H_p(3)$ (4).

Jednotkou osobního dávkového ekvivalentu je sievert [Sv] (10).

1.1.1.3 Dozimetr

Jako dozimetr se používá látka, která po ozáření mění své fyzikální nebo chemické vlastnosti, tuto změnu lze následně měřit a je přímo úměrná dávce záření. Osobní dozimetr slouží k měření dávky a dávkového příkonu záření (2).

Dozimetry lze rozdělit podle toho:

- jaký typ záření dokáží měřit (α , β , γ , n)
- které veličiny měří (dávkový příkon, dávka, aj.)
- na jakém principu měří (diferenciální, integrální)
- jaká látka se používá jako detektor (plyn, kapalina, pevná látka) (7)

Je snaha vytvořit v oblasti osobní dozimetrie tzv. ideální dozimetr. Důraz je především kladen na přesné měření požadované dozimetrické veličiny v širokém intervalu hodnot, a to pokud je to možné pro všechny druhy záření odděleně. Měl by být schopen ocenit geometrii ozáření osoby v daném radiačním poli. Požadavky jsou kladeny ale i na ekonomické a technické parametry, jako jsou např. necitlivost k jiným fyzikálním a chemickým vlivům (teplotě, světlu, vlhkosti apod.), dále jednoduché vyhodnocení, stabilita, zachování odezvy (i v případě, že dojde k výpadku napájení) a v neposlední řadě také přijatelné mechanické parametry (rozměry, hmotnost, mechanická odolnost atd.).

Ideální dozimetr se však zřejmě nikdy nepodaří vytvořit, proto je nutné nalézt alespoň optimální splnění uvedených požadavků.

Ve vývoji osobních dozimetrů jde především o to, vytvořit takový dozimetr, aby byl schopen stanovit danou veličinu energeticky nezávisle, tzn. správně a dostatečně přesně odhadnout ozáření osoby bez ohledu na to v jakém radiačním poli byla ozářena (z hlediska energetické distribuce).

Významná je pro zajištění správnosti a přesnosti hodnocení odezvy dozimetru jeho kalibrace. Je potřeba mít k dispozici reprezentativní soubor referenčních, kalibračních polí a technických prostředků, které umožní provést kalibraci a otestovat:

- linearitu odezvy osobního dozimetru a rozsah měřitelnosti dané veličiny

- závislost odezvy k různým druhům záření
- závislost odezvy dozimetru na úhlové distribuci radiačního pole
- citlivost na různé fyzikální a chemické faktory
- stabilitu odezvy v čase (4)

Pracovník s ionizujícím zářením je povinen nosit osobní dozimetr na předepsaném místě, což je levá strana hrudníku. Pokud dozimetr umístěný na referenčním místě nedovoluje odhad efektivní a ekvivalentní dávky v orgánech a tkáních, pro které jsou dané limity, je pracovník vybaven ještě doplňkovým dozimetrem, který svými vlastnostmi nebo umístěním odhad dávky umožní (32).

1.2 Metody operativní osobní dozimetrie

1.2.1 Termoluminiscenční dozimetrie

V Celostátní službě osobní dozimetrie v ČR se termoluminiscenční dozimetrie používá už více než 20 let (20). V Jaderné elektrárně Dukovany byla termoluminiscenční dozimetrie používána pro operativní monitorování zevního ozáření osob po dobu 14-ti let (od ledna 1985 do února 1999), v současné době se termoluminiscenční dozimetry nadále používají jako prstové dozimetry pro měření extremít a jako neutronové dozimetry. Také v Jaderné elektrárně Temelín jsou tyto dozimetry využívány jako prstové dozimetry a neutronové dozimetry, pro operativní monitorování zevního ozáření osob používány nebyly (19).

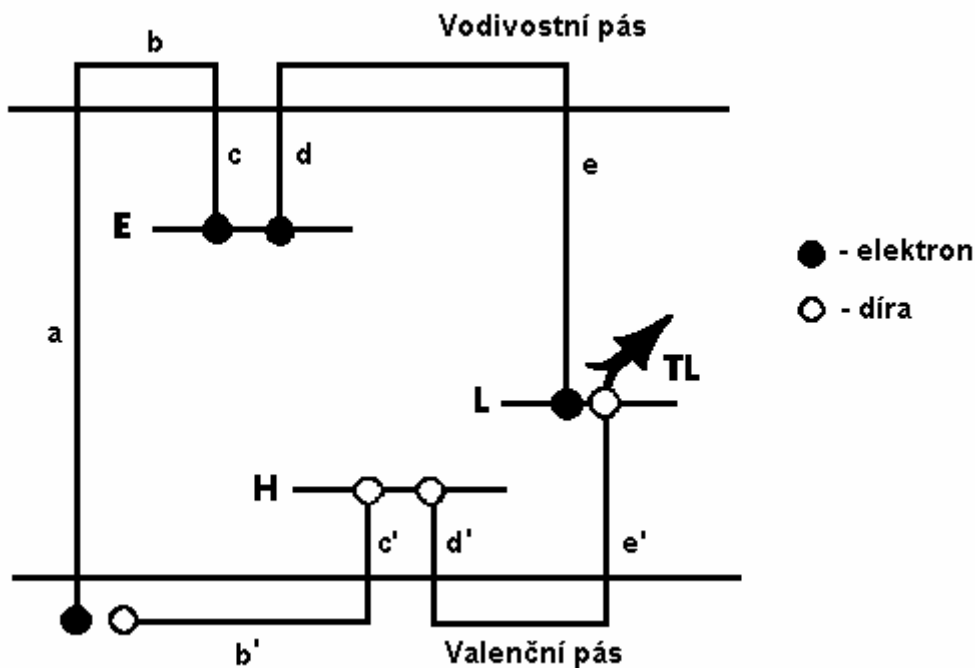
1.2.1.1 Termoluminiscence

Podstata termoluminiscence

Vznik termoluminiscence se v detektoru řídí „elektrokinetickým pásmovým modelem“ (11). Procesy, které probíhají v materiálu můžeme rozdělit do dvou kroků (8). Po interakci ionizujícího záření s termoluminiscenční látkou se vytvoří soustava iontových párů. Jsou zde záporné a kladné ionty. Zápornými jsou elektrony, které jsou

volně pohyblivé. Kladné ionty mají charakter děr s pohyblivostí výrazně omezenější. Z energetického hlediska ionizační proces má za následek přechod elektronů z valenčního do vodivostního pásu (15). Zde se ale neudrží a jsou zachyceny v některých ze záchytných pastí. Tyto pasti mohou vznikat díky nejrůznějším poruchám mříže v detektoru, způsobené odlišným uspořádáním atomů nebo přítomností příměsí kovů jako např. Mn - mangan, Dy - dysprosium (11). V pasti je elektron zachycený tak dlouho, dokud mu není dodáno dostatečné množství energie k úniku. Tato energie může být různá, závisí především na hloubce pasti. V prvním kroku tedy dochází ke vzniku elektron – děrových párů a záchytu uvolněných nosičů náboje (8).

Druhou fází je zahřátí detektoru, v níž nastává rekombinace elektronů a děr doprovázená emisí viditelného světla. Pokud je látka ohřívána, roste kinetická energie tepelného pohybu elektronů a s tím se zvyšuje i pravděpodobnost jejich uvolnění. Jiná situace nastává u zachycených děr. Děrové pasti jsou obvykle méně stabilní a k jejich úniku dochází ve velké míře už při normální pokojové teplotě (8). Po zahřátí látky se z pastí s vyšší potenciální energií elektrony uvolní a přeskočí do pastí s nižší potenciální energií. Při tomto přeskoku ztrácejí elektrony část své energie, která je vyzařována ve formě viditelného světla- většinou modrozeleného (11). To se pak ve vyhodnocovacím zařízení převádí pomocí fotonásobiče na elektrický proud, který lze snadno změřit. Tento elektrický proud je úměrný počtu elektronů uvolněných z pastí a tím i dávce záření (15). Teplota, při níž se světlo uvolňuje, je závislá na rozdílu potenciálních energií pastí a množství vyzařeného světla odpovídá absorbované dávce ionizujícího záření (11).



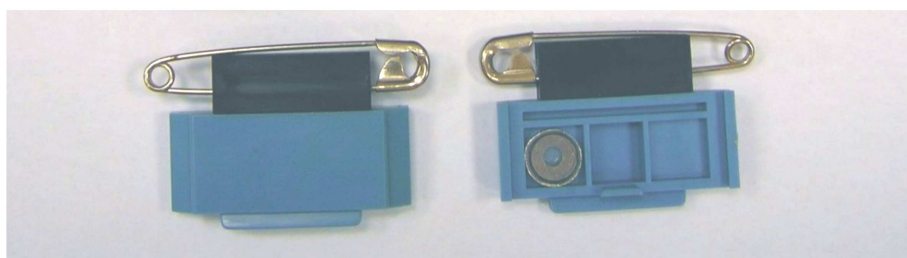
Obr. 1.2.1 Zjednodušené schéma přechodů při termoluminiscenci.

1.2.1.2 Termoluminiscenční dozimetr

Měří na integrálním principu. Integrální dozimetr má tu vlastnost, že dlouhodobě uchovává informace o dávce a v případě potřeby je možno je dekodovat. Nemá však schopnost informovat o postupném nárůstu dávky a včas upozornit na dosažení maximální přípustné hodnoty (15).

Termoluminiscenční dozimetr se skládá z dozimetrické kazety a z detektoru. Detektor může být z různého materiálu, většinou z aluminofosfátového skla nebo z LiF. Jako detektor gama záření se v České republice používá aluminofosfátové sklo, které má strukturální vzorec $\text{Al}(\text{PO}_3)_3 - \text{Mg}(\text{PO}_3)_2 - \text{Al}(\text{PO}_3)_3$.

Termoluminiscenční operativní dozimetr s AIP detektorem tvoří plastická kazeta s PbSn filtrem ve tvaru misky s víčkem o tloušťce 0,5 mm. PbSn filtr kompenzuje energetickou závislost pro energii nad 30 keV (11).



Obr. 1.2.2: Celotělový osobní TL dozimetr s AIP detektorem.

Tento dozimetr byl v jaderných elektrárnách používán jako operativní dozimetr ke stanovení dávky pracovníka po každé pracovní směně (11).

U pracovníků, u nichž jsou exponovány převážně ruce, jsou zavedeny prstové termoluminiscenční dozimetry (3).

Technické parametry TL dozimetru:

- termoluminiscenční detektor: aluminofosfátové sklo (AIP-sklo)
- měřená veličina: osobní dávkový ekvivalent $H_p(10)$
- rozsah měření: 0,2 mSv – 10 Sv (s nejistotou do $\pm 25 \%$)
- rozsah energií záření: 30 keV – 15 MeV pro fotonové záření (záření rtg a γ)

Technické parametry prstového dozimetru:

- termoluminiscenční detektor: aluminofosfátové sklo
- měřená veličina: ekvivalentní dávka $H_T = H_p(0,07)$
- rozsah měření: 0,2 mSv – 10 Sv (s nejistotou do $\pm 25 \%$)
- rozsah energií záření: 30 keV – 15 MeV pro fotonové záření (záření rtg a γ)

Vlivy na dozimetr:

1) mechanické vlivy

Mechanická odolnost je u termoluminiscenčních dozimetrů velká, nevadí jim otřesy a tlaky vyskytující se při některých manipulacích.

2) vlhkost

Termoluminiscenční dozimetry vykazují poměrně dobrou odolnost vůči vlhkosti, je možné otírat je vlažnou vodou a očistit vatou zvlhčenou lihem.

3) teplota

Použití termoluminiscenčních dozimetrů lze v rozsahu teplot od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4) chemické vlivy

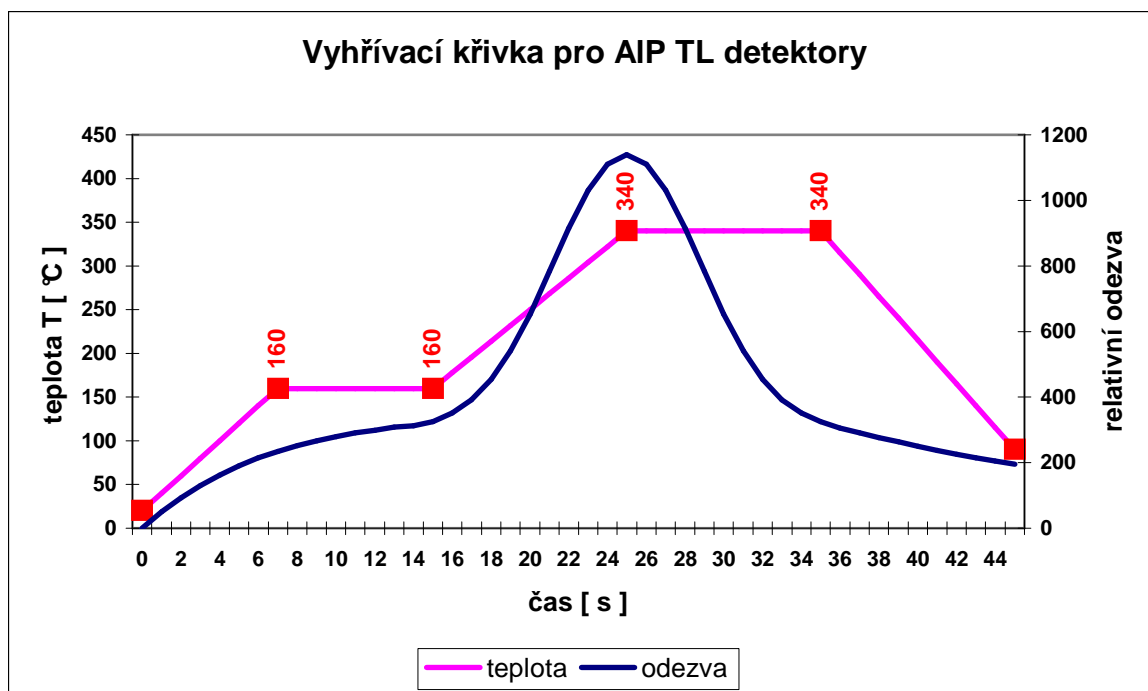
Termoluminiscenčním dozimetrům škodí rozpouštědla, zejména pak chlorovaná (13).

1.2.1.3 Měření odezev, výpočet dávek

Detektor (AlP-sklo, LiF) se umístí do TLD zařízení (TOLEDO, HARSHAW). Před začátkem měření, ještě před zapnutím zařízení, je nutné zajistit přívod dusíku, který je důležitý k vyhřívání detektoru, k odstranění kyslíku (tj. odstranění chemiluminiscence) a také k chlazení detektoru (25).

Detektor je nutno zahřívát postupně, aby byla použita jen část světla z Glow křivky. Důvodem, proč se používá jen část Glow křivky je fading (11).

Zařízení pro vyhodnocování dávek termoluminiscenčních dozimetrů má 2 části. První část je ohřívací a druhá měřicí. Při narůstající teplotě dochází k vyzařování světla a měřicí část zařízení se zapne a vypne při dosažení určité teploty. Měřicí oblast je možné u zařízení nastavit, u aluminofosfátového skla je to od $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $340\text{ }^{\circ}\text{C}$. V měřené oblasti teplot se integruje počet světelných kvant pomocí fotonásobiče a počítače. U zařízení je nutno provést kalibraci známými dávkami a vytvořit tak dávkovou závislost. Narozdíl od filmových dozimetrů se energetická závislost u termoluminiscenčních dozimetrů provádět nemusí s ohledem na její eliminaci filtrem PbSn. Ani směrová závislost s ohledem na tvar dozimetru není nějak podstatná (11). Po vyhodnocení zůstane v dozimetru uchována část původní informace. Je tedy nutné provést annealing, aby došlo k obnovení vlastností materiálu. Provádí se zahříváním materiálu na danou teplotu po určitý čas (21). U termoluminiscenčních dozimetrů je možnost mnohonásobného užití detektoru (31).



Obr. 1.2.3: Glow křivka pro AIP termoluminiscenční detektor.

Tab. 1.2.1: Hodnoty času a teploty vyhodnocovacího cyklu pro AIP TL skla.

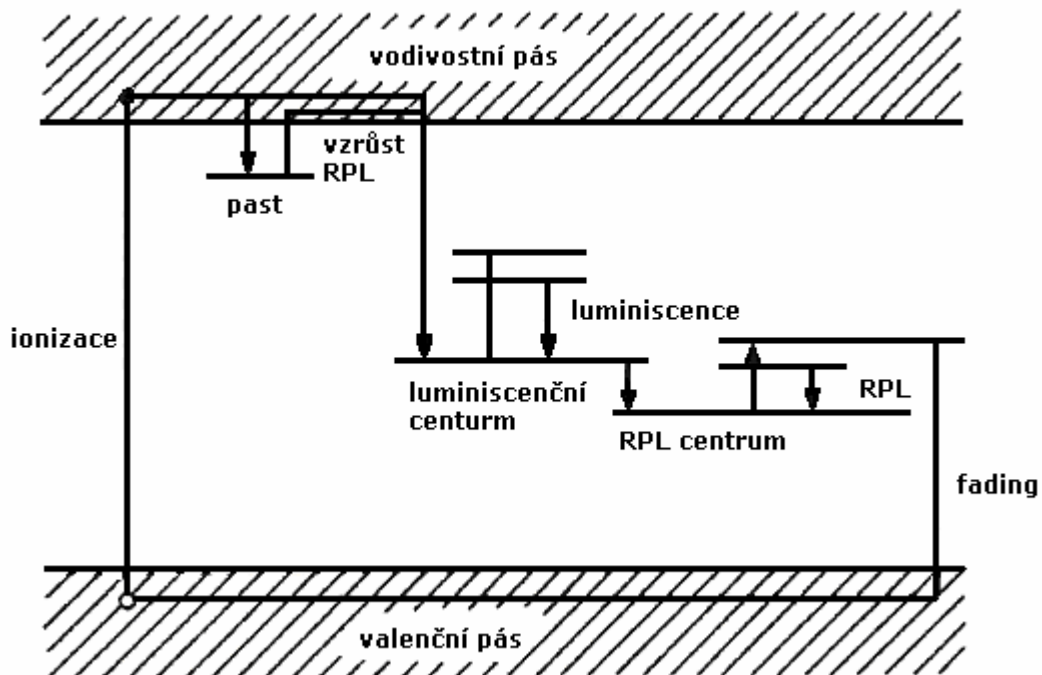
čas t1 [s]	čas t2 [s]	teplota T1 [°C]	teplota T2 [°C]	rychlost ohřevu [°C . s ⁻¹]	poznámka
PŘEDEHŘEV					
0	7	pokojevá nebo teplota po ukončení celého cyklu	160	max. 20	předehtřívání
7	15	160	160	0	výdrž na teplotě předehtřevu
VYHŘÍVÁNÍ					
15	25	160	340	18	vyhřívání na konečnou teplotu
25	35	340	340	0	výdrž na konečné teplotě
VÝPOČET DÁVKY					
20	30				integrace plochy Glow křivky

1.2.2 Radiofotoluminiscenční osobní dozimetrie

Působením ionizujícího záření mohou v některých pevných látkách vznikat luminiscenční centra. Látka, která původně (v neozářeném stavu) neměla v dané oblasti spektra luminiscenční nebo fosforescenční vlastnosti, se pak stává při excitaci viditelným nebo ultrafialovým zářením zdrojem luminiscenčního světla. Zářením utvořená centra se při excitaci neničí, informace o ozáření, kterou nesou, je trvalá. Tento jev dostal název radiofotoluminiscence (RPL).

Nejvhodnějším materiálem pro RPL je aluminofosfátové sklo dopované ionty Ag^+ . Průběh závislosti odezvy na době od ozáření je nejen funkcí teploty, při které je dozimetr skladován, ale i funkcí koncentrace stříbra ve skle, složení skla a lineárního přenosu energie dopadajícího záření.

Popis kinetiky probíhajících procesů podali na základě zjednodušeného pásového modelu H. Vogel a K. Becker. Předpokládali, že dochází k následujícím procesům (viz. Obr. 1.2.5). Ionizující záření působí ionizaci látky a přemísťuje elektrony do vodivostního pásu. Některé z nich jsou přímo zachyceny stříbrnými ionty nebo jejich komplexy v luminiscenčních centrech (Ag^+ + díra + kationtová vakance), která jsou přitom transformována na radiofotoluminiscenční centra. Radiofotoluminiscenční centra zůstávají při ozařování excitujícím světlem odpovídající vlnové délky stabilní, lze je však rozrušit dlouhodobým ohřevem na určitou teplotu, který je převede znovu na luminiscenční centra (14).



Obr. 1.2.4: Zjednodušený pásový diagram hlavních procesů, ke kterým dochází ve stříbrem aktivovaných dozimetrických sklech.

Vymazání odezvy (annealing) se provádí při zahřátí na teplotu až 400 °C po dobu jedné hodiny, tedy podobně jako u termoluminiscence (23).

Technické parametry RPL dozimetru (používaného v JE Dukovany typ SC1):

- měřená veličina: osobní dávkový ekvivalent $H_p(10)$
- rozsah měření: 0,001 mSv - 10 Sv
- nejistota měření: do 0,1 mSv menší než 5%
do 1 mSv menší než 2%
do 10mSv menší než 1%
- rozsah energií záření: 12 keV - 3 MeV
- úhlová závislost: $\pm 30\%$ pro $0^\circ - 60^\circ$

Vlivy na dozimetr:

1) mechanická vlivy

Mechanická odolnost u radiofotoluminiscenčních dozimetrů je velká, nevdí jim otřesy a tlaky vznikající při běžných manipulacích.

2) vlhkost

Radiofotoluminiscenční dozimetry vykazují poměrně dobrou odolnost vůči vlhkosti, je možné je otírat vodou a očistit vatou zvlhčenou lihem.

3) chemické vlivy

Radiofotoluminiscenčním dozimetrům škodí organická rozpouštědla (13).

1.2.3 Elektronická osobní dozimetrie

Elektronické osobní dozimetry pracují na bázi Geiger-Müllerových nebo, dnes častěji, na bázi Si-polovodičových detektorů. Při použití elektronického dozimetru se třemi Si-detektory s různou energetickou závislostí lze současně měřit několik dozimetrických veličin jako např. $H_p(10)$, $H_p(0,07)$ a příkonu těchto veličin (11).

Elektronický osobní dozimetr má obvykle dvě signální úrovně, výstrahu a alarm, pro všechny měřené veličiny. Signalizace je akustická a rovněž vizuální na displeji. Do příslušného dozimetru jsou při přihlašování v terminálu na základě zadaných kódů a činností naprogramovány hodnoty signálních úrovní. Nespornou výhodou těchto dozimetrů při operativním monitorování je, že síťové propojení přihlašovacích terminálů a administrativních stanic v Systému elektronické osobní dozimetrie (SEOD) zajišťuje okamžité informace o denních dávkách jednotlivců a o kolektivní dávce. SEOD byl v jaderných elektrárnách Temelín a Dukovany zaveden od roku 2000 (19).

1.2.3.1 Křemíková dioda

Na začátku 50. let se začaly provádět výzkumné programy polovodičových monokrystalických materiálů, především germania a křemíku, díky kterým bylo možné získat využít získané znalosti a osvojené technologie pro výzkum a vývoj polovodičových detektorů (1).

Polovodičové detektory

Polovodičová dioda je složena ze dvou příměsových polovodičů – první polovodič je typu N (katoda) a druhý polovodič je typu P (anoda). Na rozhraní těchto polovodičů vznikne přechod P-N (29).

Prostor mezi elektrodami je vyplněn detektorem, v němž se vytvářejí při interakci ionizujícího záření s látkou nosiče elektrického náboje, které se pod vlivem elektrického pole pohybují k příslušným elektrodám. Vznikají zde proudové či napěťové impulsy, které pak slouží jako výstupní signál. Velikost těchto impulsů je pak přímo úměrná energii deponované v citlivém objemu detektoru.

Polovodičové detektory se vyrábějí především z křemíku nebo germania. Zvětšení citlivého objemu detektoru se provádí prostřednictvím zabudování atomů lithia (tzv. driftem) do krystalické mřížky výchozího prvku. Nevýhodou polovodičových detektorů je však jejich vysoká cena (9).

Vlastnosti polovodičů

Křemík krystalizuje v diamantové struktuře a na vnější slupce obalu se nacházejí 4 elektrony zprostředkující kovalentní vazby sousedních atomů.

Střední energie w důležitá pro vznik jednoho páru elektron- díra je v křemíku jen kolem 3 eV, a to především díky malé šířce zakázaného pásu polovodičů. Proces vzniku párů při interakci není přesně znám, bylo však zjištěno, že střední hodnota energie w závisí na druhu polovodičového materiálu a také na teplotě, ale už jen velmi málo na druhu záření (1).

1.2.3.2 Parametry elektronického osobního dozimetru typu EPD1 podle firmy Siemens

Elektronický osobní dozimetr je citlivý na záření gama, X (fotony) a na záření beta (energetické elektrony).

Detektorem ionizujícího záření v tomto dozimetru jsou 3 křemíkové diody, které jsou odlišně citlivé na druh a energii záření. Z těchto tří naměřených hodnot jsou vypočítané informace o příkonech a hodnotách osobních dávkových ekvivalentů $H_p(10)$ a $H_p(0,07)$. Lze u nich nastavit různé prahové úrovně a v případě, že některá hodnota

celkové dávky nebo dávkový příkon tyto úrovně překročí, dojde ke spuštění vizuálního a akustického alarmu.

Při překročení zadané prahové úrovně pro hodnotu dávkového ekvivalentu nebo příkonu dávkového ekvivalentu, dojde ke spuštění alarmu. Alarm je jak vizuální, tak akustický. Existuje několik druhů alarmu, které závisí na příčině, jež vedla k jeho spuštění.

Ovládání EPD1 dozimetru je celkem snadné, pomocí 2 pryžových tlačítek na přední straně. Jednotlivé informace lze zobrazovat na LCD displeji v horní části dozimetru. Pro srozumitelné ovládání je na zadní části dozimetru umístěn informační štítek s významem a použitím tlačítek (24).

- rozsah měření: dávkový ekvivalent: 0 μ Sv - 16 Sv
příkon dávkového ekvivalentu: 0 μ Sv/h - 16 Sv/h
- energetická odezva $H_p(10)$ - fotony: od 20 keV – 1,5 MeV menší než $\pm 30\%$
od 1,5 MeV – 10 MeV menší než $\pm 50\%$
- energetická odezva $H_p(0,07)$ – střední energie β : 250 keV – 1,5 MeV menší než $\pm 30\%$
- linearita dávkového příkonu: $H_p(10)$ 0 Sv/h - 0,5 Sv/h menší než $\pm 10\%$
0,5 Sv/h - 1 Sv/h menší než $\pm 20\%$
1 Sv/h - 2 Sv/h menší než $\pm 30\%$
2 Sv/h - 4 Sv/h menší než $\pm 50\%$
 $H_p(0,07)$ 0 μ Sv/h - 1 Sv/h menší než $\pm 20\%$
1 Sv/h - 50 Sv/h pokračuje v akumulaci dávky
při příkonu větším než 1 Sv/h
- napájení: Lithium Thionyl Chloride 5Ah
- doba nepřetržitého provozu: při běžném používání 12 měsíců do vybití baterie
- elektromagnetické rušení: s chybou 10% své normální odezvy bude měřit při následujících podmínkách:

Elektrické pole:

E= 25 V/m 10 kHz – 250 kHz RMS

E= 50 V/m 250 kHz – 1 GHz RMS

$E = 5 \text{ V/m}$ 100 kHz – 1 GHz RMS

Magnetické pole:

$H = 60 \text{ A/m}$ 50 Hz – 60 Hz RMS

$H = 4 \text{ A/m}$ 10 kHz – 1 MHz RMS

$B = 10 \text{ mT}$

(elektronické osobní dozimetry není vhodné používat v prostředí s výkonnými radary např. letiště, v blízkosti mobilních telefonů, mikrovlnné trouby apod.)

- alarmy: zvukový: 80 dB ve 30 cm; optický: červená LED a blikající displej
- teplotní rozsah: provozní: - 10 °C až + 40 °C
skladovací: - 25 °C až + 70 °C
- vlhkost: až 90 %, nekondenzující
- mechanická odolnost: odolný vůči nárazům
- rozměry: 86 mm x 62,5 mm x 30,2 mm
- hmotnost: 170 g (26)

1.2.3.3 Parametry elektronického osobního dozimetru typu DMC 2000XB podle firmy MGP Instruments

Elektronický osobní dozimetr DMC 2000XB je schopen měřit dávky radiačních pracovníků od záření gama, X a záření beta. Obsahuje také energeticky kompenzované křemíkové diody. Každá z nich je citlivá na různé druhy záření a různou energii. Z těchto detektorů jsou výstupy zkombinovány tak, že udávají informaci o dávkových ekvivalentech $H_p(10)$ a $H_p(0,07)$. Kromě dávky dozimetr opět počítá i dávkový příkon pro oba dávkové ekvivalenty. Všechny hodnoty se mohou zobrazovat na LCD displeji (27).

- rozsah měření: dávkový ekvivalent: 1 μSv - 10 Sv
příkon dávkového ekvivalentu: 10 $\mu\text{Sv/h}$ - 10 Sv/h
- energetický rozsah: 20 keV – 6 MeV pro X a γ
od $E_{stř} = 60 \text{ keV}$ pro β
- energetická odezva $H_p(10)$ - fotony: od 20 keV - 3 MeV menší než $\pm 30 \%$

od 3 MeV - 6 MeV menší než $\pm 50 \%$

- energetická odezva $H_p(0,07)$ – střední energie β : menší než $\pm 30 \%$ pro
 $E_{stř} > 60 \text{ keV}$
- linearita dávkového příkonu: menší než $\pm 10\%$ do 1 Sv/h
menší než $\pm 25\%$ od 1 Sv/h do 10 Sv/h
- napájení: LiMnO₂ článek CR 2450 RENATA nebo TOSHIBA
- doba nepřetržitého provozu: při běžném používání 8 -12 měsíců do vybití baterie
- ochrana proti elmag. rušení: v souladu s normami EEC (89/336 a 73/23) a
- alarmy: zvukový: 85 dB ve 30 cm; optický: červená LED a blikající displej
- teplotní rozsah: provozní: - 100 °C až + 500 °C
skladovací: - 300 °C až + 700 °C
- vlhkost: menší než 90 %
- mechanická odolnost: odolný vůči nárazům, vibracím a pádům
- rozměry: 86,5 mm x 48 mm x 18,5 mm
- hmotnost: 56 g včetně baterie (28)

1.2.3.4 Systém elektronické osobní dozimetrie

Systém elektronické osobní dozimetrie (typově označovaný jako SEOD) slouží k operativnímu monitorování externího ozáření radiačních pracovníků. Tento systém je schopný poskytovat množství okamžitých informací o dávkách a analyzovat získané údaje, což dále slouží jako podklad pro lepší plánování kolektivní efektivní dávky pracovníků (19).

Charakteristické prvky systému:

- umí pro každou osobu sumarizovat čerpání dávek $H_p(10)$, $H_p(0,07)$, $H_p(10)$ neutron pro různě dlouhé období: den, měsíc, rok a 5 let
- díky systému je možné limitovat individuální čerpání dávek v souvislosti s legislativně určenými limity
- umožňuje zavést do systému čerpání dávek i z legální dozimetrie

- je schopen u každé osoby sledovat čerpání celkových dávek, dávek u konkrétní činnosti, objektu, zařízení a R-příkaz
- systém lze propojit s ostatními informačními systémy v dané lokalitě (30)

Systém elektronické osobní dozimetrie (SEOD) se skládá z těchto základních částí:

- elektronické osobní dozimetrie (EOD)
- fyzická vrstva (HW)
- logická vrstva (SW) (19)

Elektronické osobní dozimetrie

Systém SEOD byl navržen jako univerzální, tedy dokáže komunikovat s jakýmkoliv typem elektronického dozimetru od různých výrobců. V současnosti umí pracovat s dozimetry od firem MGP Instruments a Siemens (30).

Fyzická vrstva systému (HW)

Tuto vrstvu systému SEOD představují terminály, administrátorské stanice- PC a server, které jsou propojené lokální počítačovou sítí.

Základní částí systému je terminál elektronické dozimetrie, pomocí něhož se systémem pracovníci v kontrolovaném pásmu komunikují. Terminál se sestává z technologického počítače s LCD displejem, který obsahuje dotykový panel a čtečku dozimetrů. Díky terminálu se odečítají naměřené hodnoty dávek při výstupu a odhlášení radiačních pracovníků z kontrolovaného pásma.



Obr. 1.2.5: Terminál systému elektronické osobní dozimetrie na JE Temelín.

Logická vrstva systému (SW)

Na serveru je instalována databáze typu ORACLE, kde jsou archivována všechna data. Administrátorské stanice obsahují moduly aplikačního SW pro správu systému SEOD a k analýze dat, terminály mají SW moduly pro řízení procesu vstupu a výstupu pracovníků z a do kontrolovaného pásma.

Při vstupu do kontrolovaného pásma je povinností každého pracovníka vyzvednout si spolu s filmovým také elektronický dozimetr a přihlásit se do SEOD na příslušném terminálu u vstupního místa do kontrolovaného pásma. Pracovník se přihlásí za použití své identifikační karty a dále je žádán k vyplnění kódu zařízení, na kterém bude pracovat a hlavní činnost, kterou bude při tomto vstupu vykonávat, případně zadá ještě číslo radiačního R-průkazu. Při této činnosti má možnost volby z 50 kódů pro zařízení a 62 kódů pro specifikaci činností. Po dokončení práce se pracovník při

výstupu z kontrolovaného pásma na terminálu opět odhlásí a na displeji se objeví informace o obdržené dávce za jeho pobyt v něm a o celkové dávce, kterou obdržel v daném kontrolovaném pásmu od začátku kalendářního roku (19).

1.2.3.5 Porovnání filmové a elektronické osobní dozimetrie

System elektronické osobní dozimetrie je využíván na obou jaderných elektrárnách jak na Jaderné elektrárně Temelín, tak na Jaderné elektrárně Dukovany. Ani na jedné však není elektronická osobní dozimetrie primárním prostředkem osobního monitorování, tím je dozimetrie filmová. V současné době se usiluje o certifikaci elektronické dozimetrie jako legální prostředek pro sledování radiační zátěže pracovníků (18).

Výhody filmové dozimetrie

- nízká cena a dostatečná spolehlivost
- možnost redundance v případě ozáření vyššími dávkami (havarijní filmy)
- malé rozměry dozimetrů a velmi malé riziko poškození
- není potřeba vlastního zdroje proudu (baterie)

Nevýhody filmové dozimetrie

- po pobytu v kontrolovaném pásmu nelze provést operativní vyhodnocení dozimetru - neumožňují okamžitou analýzu osobní dávky ve vztahu k daným činnostem na určitém zařízení a také ve vztahu k aktuální radiační činnosti
- neexistuje u nich funkce signalizace (alarmu) překročení přednastavitelných hodnot efektivní dávky a příkonu dávkového ekvivalentu

Výhody elektronické dozimetrie

- nepřetržitá kontrola expozice radiačních pracovníků, která vede k rozvoji radiační ochrany, především k lepšímu řízení radiačních prací
- umožňuje signalizaci (alarm) při překročení přednastavitelných hodnot efektivní dávky a příkonu dávkového ekvivalentu

- detekční limit je 1 μSv
- významné je rozlišení dávek radiačních pracovníků pro jednotlivé činnosti, objekty a zařízení v kontrolovaných pásmech

Nevýhody elektronické dozimetrie

- byla prokázána možnost ovlivnění elektromagnetickým zářením
- vlastní zdroj proudu - z toho vyplývá nutnost údržby a výměny baterií, ale i riziko selhání baterie
- nákladnost a možnost poškození při nárazu (22)

2. Cíle práce a hypotézy

Cílem mé práce je porovnání několika parametrů, jako jsou dávková, směrová a energetická závislost, u dvou typů osobních elektronických dozimetrů firmy Siemens a MGP Instruments.

Podle firem Siemens a MGP Instruments jsou jejich osobní dozimetry z hlediska parametrů lepší než konkurenční. Uživatelé však tvrdí, že rozdíly mezi nimi nejsou podstatné.

3. Metodika

Zvolenou metodikou je nejprve ověřování jednotlivých parametrů, u obou typů elektronických osobních dozimetrů, prováděné ozařováním při různých podmínkách v cejchovně v Jaderné elektrárně Temelín a v Českém metrologickém institutu. Poté následovalo statistické zpracování získaných dat.

Popis: a) ozařování

Dávková a směrová závislost dozimetrů

Ozařování dozimetrů bylo prováděno v cejchovně na oddělení Laboratoř metrologie ionizujícího záření Jaderné elektrárny Temelín. Ozařováno bylo 10 dozimetrů typu EPD1 a 10 typu DMC 2000XB od firmy MGP Instruments. Byly použity radionuklidové zářiče s těmito charakteristikami:

URZ č.	radionuklid	aktivita	k datu
1	Cs-137	25,2 MBq	24. 10. 1997
2	Cs-137	6,99 GBq	24. 10. 1997
3	Cs-137	1,22 TBq	24. 10. 1997
4	Cs-137	65,5 TBq	24. 10. 1997

Hodnoty osobního dávkového ekvivalentu, kterými se dozimetry ozařovaly, byly: 0,005 mSv, 0,010 mSv, 0,050 mSv, 0,100 mSv, 0,500 mSv, 1 mSv, 50 mSv, 100 mSv. Ozařování probíhalo s dozimetry umístěnými na fantomu (tkáni ekvivalentní kvádr definovaných rozměrů [ICRU-1993]) i samostatně bez něj.

Pro posouzení směrové závislosti se ozařovalo zředu ($\alpha = 0^\circ$, osa hrud' záda), z levého a pravého boku ($\alpha = 90^\circ$), pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ a nakonec i zadní část dozimetru $\alpha = 180^\circ$.

Měření proběhlo pomocí programu DaRS-Modul ozařovna, který automaticky po zadání požadované dávky vypočítá vzdálenost optické lavice od zdroje a vybere vhodný zářič. Doba ozařování byla 300 s u všech dávek, pouze u dávky 0,050 mSv byla stanovena na 180 s, protože při vložení 300 s program nebyl schopen nastavit vzdálenost. Poté následovalo odečítání zaznamenaných hodnot veličiny $H_p(10)$.

Vymazání odezev u dozimetrů DMC 2000XB se provádělo ručně. Kumulovaná dávka je v režimu RESET vynulována při každém přepnutí z režimu PAUSE do režimu MEASUREMENT (MĚŘENÍ) (27).

Hodnoty naměřené dozimetry typu EPD1 se nulovaly pomocí čtečky v počítači programem EASY EPD.

Energetická závislost

Pro zjištění energetické závislosti se dozimetry ozařovaly v Českém metrologickém institutu a postup byl obdobný jako u dávkové a směrové závislosti. Dozimetr se vložil do místa referenčního pole a provedlo se ozáření známou hodnotou 1 mSv. Tento postup se opakoval pro různé energie záření. Energie, kterými se provádělo ozařování pomocí rentgenu byly: 16 keV, 33 keV, 48 keV, 65 keV, 83 keV, 100 keV, 118 keV a 164 keV. Energie 662 keV se ozařovala zářičem ^{137}Cs a 1250 keV zářičem ^{60}Co . Ozařování probíhalo na PMMA fantomu 30 x 30 x 15 cm a doba měření byla stanovena na 240 s.

b) statistické zpracování

Pro statistické zpracování jsem použila MS Excel včetně grafických funkcí.

K vyhodnocení naměřených hodnot a k potvrzení nebo vyvrácení stanovené hypotézy jsem použila tyto výpočty:

- průměr (\bar{x})

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

- rozptyl (s^2) = průměr čtverců odchylek od průměru

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

n - 1 ...počet stupňů volnosti rozptylu

- směrodatná odchylka (s) = druhá odmocnina z rozptylu

Pro lepší porovnání výsledků jsou zde uvedeny i relativní směrodatná odchylka a odchylka měření od referenční dávky, obě vyjádřené v procentech.

K potvrzení nebo vyvrácení dané hypotézy jsem využila dvouvýběrový t test.

▪ dvouvýběrový t test:

Postup výpočtu:

1. stanovení nulové hypotézy, která je obvykle opakem toho, co chceme výzkumem prokázat, když zahájíme studii a začínáme sbírat data. V mém případě nulová hypotéza zní: H_0 = rozdíl mezi dozimetry EPD1 a DMC 2000XB je nulový.

Předpokládá se, že H_0 je pravdivá; testová statistika má tvar:

$$T = \frac{\text{rozdíl výběrových průměrů} - \text{očekávaný rozdíl za platnosti } H_0}{\text{odhad směrodatné chyby rozdílu výběrových průměrů}}$$

2. vypočtení výběrových rozptylů pro jednotlivé skupiny podle vztahu:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2.$$

3. dále vypočtení sdruženého odhadu rozptylu podle vztahu:

$$s_d^2 = \frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2},$$

4. vypočtení sdruženého odhadu směrodatné odchylky dle vztahu:

$$s_d = s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}.$$

5. vypočtení rozdílu výběrových průměrů:

$$\bar{d} = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$$

6. do testové statistiky se již jen dosadí:

$$T = \frac{\bar{d} - 0}{s_d}.$$

7. zvolení hladiny významnosti α . Pro výpočet jsem použila $\alpha = 0,05$. Poté zjistíme počet stupňů volnosti dle vztahu:

$n_1 + n_2 - 2 \rightarrow$ v tabulkách si nalezneme příslušnou kritickou hodnotu \rightarrow získáme interval s krajními body:

\rightarrow pokud se T vejde do utvořeného intervalu \rightarrow přijímáme H_0

→ pokud se T nevejde nebo se bude rovnat krajnímu bodu intervalu →
zamítáme H_0

V mé práci jsem postupovala trochu odlišně, protože jsem zpracovávala data na počítači a mohla jsem tedy vypočítat dosaženou hladinu testu p . Hladina testu p je pravděpodobnost, že pozorujeme naše data nebo data stejně či více extrémní, když je nulová hypotéza pravdivá.

Pokud je vypočtená p -hodnota t testu menší než zvolená mezní hodnota α , tedy hladina významnosti, kterou jsem v tomto případě volila $\alpha = 0,05$ (neboli 5 %), zamítneme nulovou hypotézu.

Zamítneme-li nulovou hypotézu, přijmeme hypotézu alternativní, která říká, že rozdíl mezi dozimetry EPD1 a DMC 2000XB není nulový - jeden se ukazuje být prokazatelně lepší.

Dále jsem k zjišťování dávkové závislosti využila statistickou funkci lineární regrese, která pomocí metody nejmenších čtverců vypočítá a vrátí matici hodnot popisujících přímku, jež nejlépe odpovídá zadaným datům. Následně vznikla regresní přímka, lineární funkce vyjadřující závislost "naměřené dávky" na "referenční dávce" (16).

4. Výsledky

Ve své diplomové práci jsem se pokusila porovnat 2 typy dozimetrů. K tomu jsem sledovala 3 závislosti – dávkovou, směrovou a energetickou. EPD1 a DMC 2000XB jsem porovnávala proto, že dozimetry firmy Siemens typu EPD1 se na Jaderné elektrárně Temelín začaly nahrazovat dozimetry firmy MGP Instruments typu DMC 2000XB.

4.1 Dávková a směrová závislost

V níže uvedených tabulkách jsou uvedeny naměřené dávkové ekvivalenty $H_p(10)$ dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB k zjištění dávkové závislosti, pro referenční hodnoty 0,005 mSv, 0,010 mSv, 0,050 mSv, 0,100 mSv, 0,500 mSv, 1 mSv, 50 mSv, 100 mSv. Současně je zde také statistické zpracování těchto dat. V této kapitole jsou zahrnuty tabulky pro všechny směry ozařování k určení směrové závislosti. První jsou výsledky ozáření zleva pod úhly $\alpha = 90^\circ$ a $\alpha = 45^\circ$, zpředu $\alpha = 0^\circ$, zprava pod úhly $\alpha = 90^\circ$ a $\alpha = 45^\circ$ a nakonec i zadní část dozimetru $\alpha = 180^\circ$.

Nejprve jsou vloženy výsledky měření dozimetrů bez fantomu, tedy volně v prostoru a posléze umístěnými na fantomu. Při měření jsem sledovala pouze veličinu $H_p(10)$.

V uvedených grafech jsou vyneseny naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované v daném směru. Na obou osách jsou hodnoty rozdílu řádu, a proto vynesené body nebyly dobře viditelné a překrývaly se. Pro přehlednější zobrazení bodů jsem ve formátu osy využila logaritmické měřítko. Osy jsem poté musela ještě upravit, posunout je tak, aby se protínaly v malé hodnotě, zvolila jsem 0,000000001 (místo bodu 0).

Volně v prostoru

Tab. 4.1.1: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z levého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ ve volném prostoru. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,005 mSv		0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv		1 mSv		50 mSv		100 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,003	0,003	0,008	0,009	0,037	0,042	0,077	0,084	0,377	0,390	0,736	0,651	36,76	36,67	68,86	84,83
2	0,004	0,003	0,007	0,008	0,040	0,035	0,078	0,070	0,393	0,360	0,783	0,696	39,62	47,19	80,08	88,01
3	0,004	0,003	0,008	0,008	0,042	0,034	0,084	0,068	0,407	0,460	0,804	0,799	40,51	45,47	81,30	84,35
4	0,004	0,003	0,008	0,006	0,043	0,038	0,083	0,074	0,402	0,388	0,839	0,769	40,87	38,13	84,58	115,20
5	0,003	0,004	0,009	0,008	0,041	0,039	0,080	0,083	0,394	0,408	0,797	0,770	39,87	39,65	85,26	82,27
6	0,003	-	0,008	-	0,041	-	0,079	-	0,392	-	0,786	-	39,65	-	78,61	-
7	0,004	0,004	0,007	0,008	0,038	0,037	0,076	0,085	0,405	0,390	0,775	0,695	39,20	51,22	79,96	92,86
8	0,004	0,004	0,007	0,009	0,041	0,036	0,082	0,071	0,412	0,344	0,824	0,685	41,22	36,96	83,22	83,65
9	0,003	0,003	0,008	0,006	0,039	0,037	0,075	0,072	0,399	0,373	0,801	0,755	42,55	51,71	83,55	104,80
10	0,004	0,004	0,007	0,009	0,040	0,043	0,081	0,086	0,406	0,334	0,809	0,676	43,21	50,59	80,79	113,70
průměr	0,004	0,003	0,008	0,008	0,040	0,038	0,080	0,077	0,399	0,383	0,795	0,722	40,346	44,177	80,621	94,408
sm. odchylka	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,007	0,010	0,037	0,028	0,052	1,812	6,361	4,668	13,284
rel. sm. odchyl. [%]	14,344	15,301	8,766	14,789	4,511	7,967	3,808	9,521	2,536	9,782	3,556	7,176	4,490	14,400	5,790	14,071
odchylka [%]	-28,0	-31,1	-23,0	-21,1	-19,6	-24,2	-20,5	-23,0	-20,3	-23,4	-20,5	-27,8	-19,3	-11,6	-19,4	-5,6
p-hodnota F-test	0,943		0,123		0,150		0,016		0,001		0,090		0,001		0,005	
p-hodnota t-test	0,525		0,667		0,056		0,362		0,254		0,001		0,115		0,007	
rozdíly průměrů	0,000		0,000		-0,002		-0,002		-0,016		-0,074		3,831		13,787	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

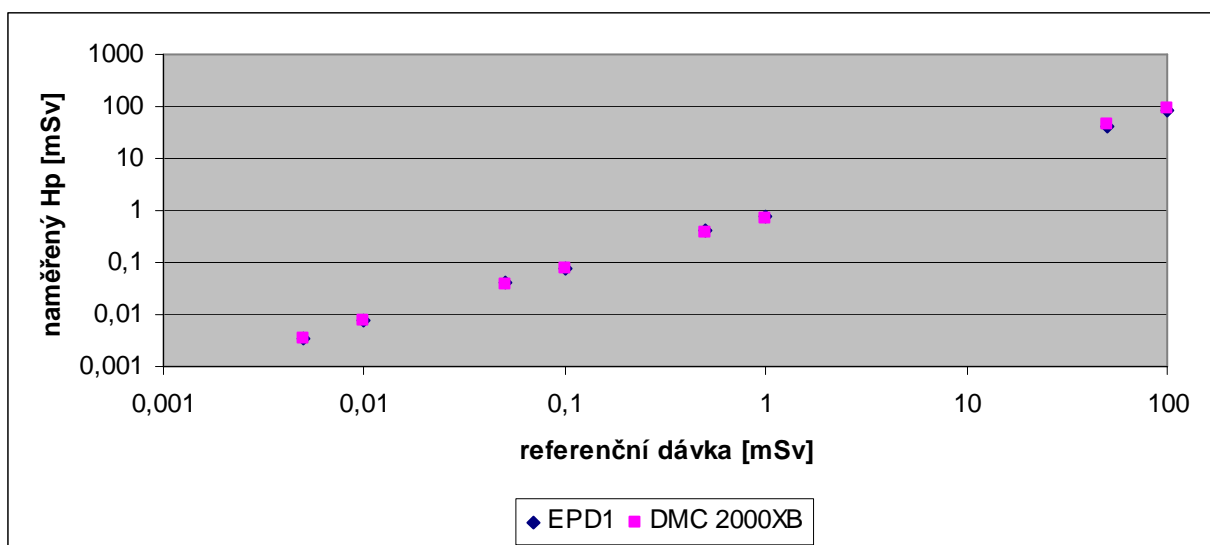
Poznámky: dozimetr č. 6 typu DMC 2000XB měřil chybně

Tab. 4.1.2: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R) \cdot 100$	$(N_D/R) \cdot 100$
0,005	0,0036	0,0034		
0,010	0,0077	0,0079	77	79
0,050	0,040	0,038	80	76
0,100	0,080	0,077	80	77
0,500	0,399	0,383	79,8	76,6
1	0,795	0,722		
50	40,346	44,177		
100	80,621	94,408		
		průměr	79,2	77,2

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D – naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.1: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z levého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ ve volném prostoru.

Tab. 4.1.3: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z levého boku pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ ve volném prostoru. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,008	0,010	0,040	0,049	0,081	0,099	0,414	0,494
2	0,008	0,009	0,043	0,050	0,088	0,101	0,447	0,497
3	0,008	0,010	-	0,050	-	0,100	-	0,506
4	0,009	0,009	0,044	0,048	0,088	0,098	0,450	0,491
5	0,009	0,009	0,043	0,049	0,087	0,099	0,446	0,499
6	0,008	-	0,043	-	0,087	-	0,442	-
7	0,008	0,009	0,041	0,049	0,082	0,099	0,411	0,501
8	0,009	0,010	0,044	0,048	0,087	0,098	0,438	0,492
9	0,008	0,009	0,042	0,048	0,088	0,098	0,441	0,505
10	0,009	0,010	0,043	0,048	0,087	0,098	0,447	0,494
průměr	0,008	0,009	0,043	0,049	0,086	0,099	0,437	0,498
sm. odchylka	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,015	0,005
rel. sm. odchyl. [%]	6,148	5,580	3,133	1,708	3,097	1,066	3,329	1,101
odchylka [%]	-16,0	-5,6	-14,9	-2,4	-13,9	-1,1	-12,5	-0,5
p-hodnota F-test	0,943		0,205		0,017		0,012	
p-hodnota t-test	0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,001		0,006		0,013		0,060	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%]- relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

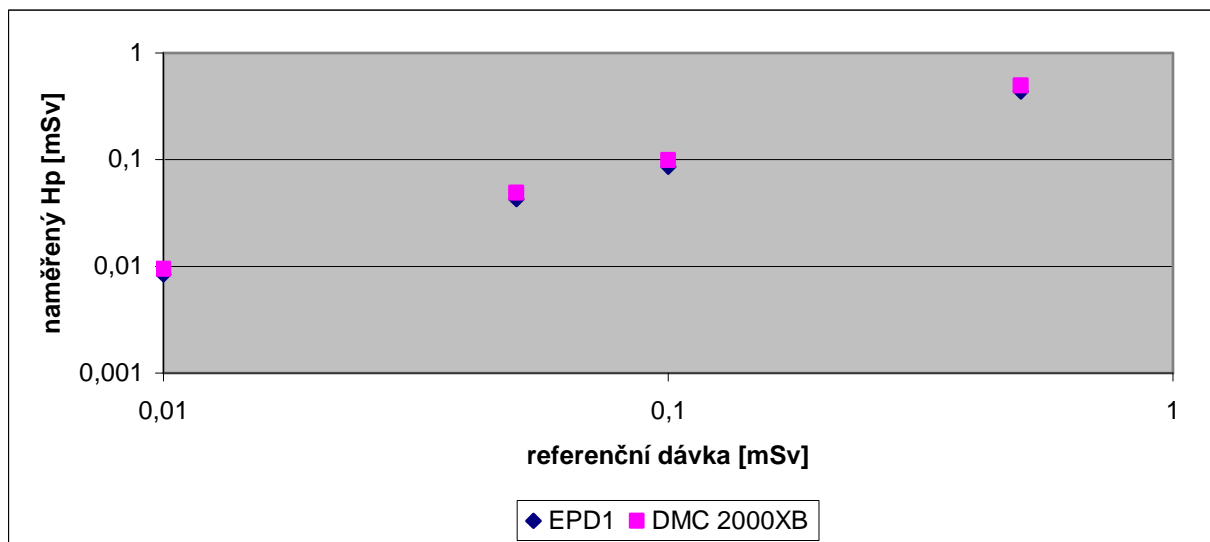
Poznámky: dozimetr č. 6 typu DMC 2000XB a dozimetr č. 3 typu EPD1 měřil chybně

Tab. 4.1.4: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R).100$	$(N_D/R).100$
0,010	0,0084	0,0094	84	94
0,050	0,0426	0,0488	85,2	97,6
0,100	0,0861	0,099	86,1	98,9
0,500	0,4373	0,4977	87,46	99,54
		průměr	85,69	97,51

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.2: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z levého boku pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ ve volném prostoru.

Tab. 4.1.5: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z čela pod úhlem $\alpha = 0^\circ$ ve volném prostoru.

Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,005 mSv		0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv		1 mSv		50 mSv		100 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,004	0,004	0,009	0,010	0,043	0,049	0,088	0,098	0,459	0,492	0,887	1,002	44,74	58,07	90,1	129,7
2	0,004	0,005	0,009	0,010	0,046	0,050	0,094	0,101	0,468	0,503	0,942	1,002	47,05	60,00	95,6	141,2
3	0,004	0,004	0,009	0,010	0,047	0,051	0,095	0,101	0,473	0,511	0,956	1,035	47,70	60,44	97,0	138,2
4	0,004	0,005	0,009	0,010	0,046	0,048	0,096	0,101	0,484	0,500	0,974	1,015	49,00	59,53	100,2	135,4
5	0,004	0,004	0,010	0,011	0,046	0,051	0,095	0,101	0,475	0,507	0,962	1,024	48,45	59,41	99,2	133,4
6	0,005	-	0,009	-	0,046	-	0,092	-	0,467	-	0,942	-	47,48	-	96,4	-
7	0,004	0,004	0,009	0,010	0,043	0,050	0,087	0,102	0,448	0,512	0,895	1,037	45,05	59,82	91,8	140,1
8	0,004	0,004	0,010	0,011	0,046	0,049	0,095	0,099	0,476	0,500	0,961	1,008	47,82	59,50	96,6	137,8
9	0,004	0,004	0,010	0,011	0,046	0,048	0,091	0,099	0,470	0,506	0,951	1,019	47,31	59,18	96,0	135,7
10	0,004	0,005	0,010	0,010	0,046	0,049	0,095	0,099	0,476	0,502	0,956	1,011	47,81	59,17	96,5	135,5
průměr	0,004	0,004	0,009	0,010	0,046	0,049	0,093	0,100	0,470	0,504	0,943	1,017	47,241	59,458	95,939	136,333
sm. odchylka	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,010	0,006	0,029	0,013	1,357	0,660	3,023	3,501
rel. sm. odchyl. [%]	7,713	11,538	5,494	4,839	2,976	2,286	3,438	1,363	2,151	1,228	3,060	1,276	2,873	1,110	3,151	2,568
odchylka [%]	-18,0	-13,3	-6,0	3,3	-9,0	-1,1	-7,2	0,1	-6,1	0,7	-5,7	1,7	-5,5	18,9	-4,1	36,3
p-hodnota F-test	0,194		0,938		0,622		0,025		0,182		0,035		0,054		0,667	
p-hodnota t-test	0,236		0,001		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,000		0,001		0,004		0,007		0,034		0,074		12,217		40,394	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

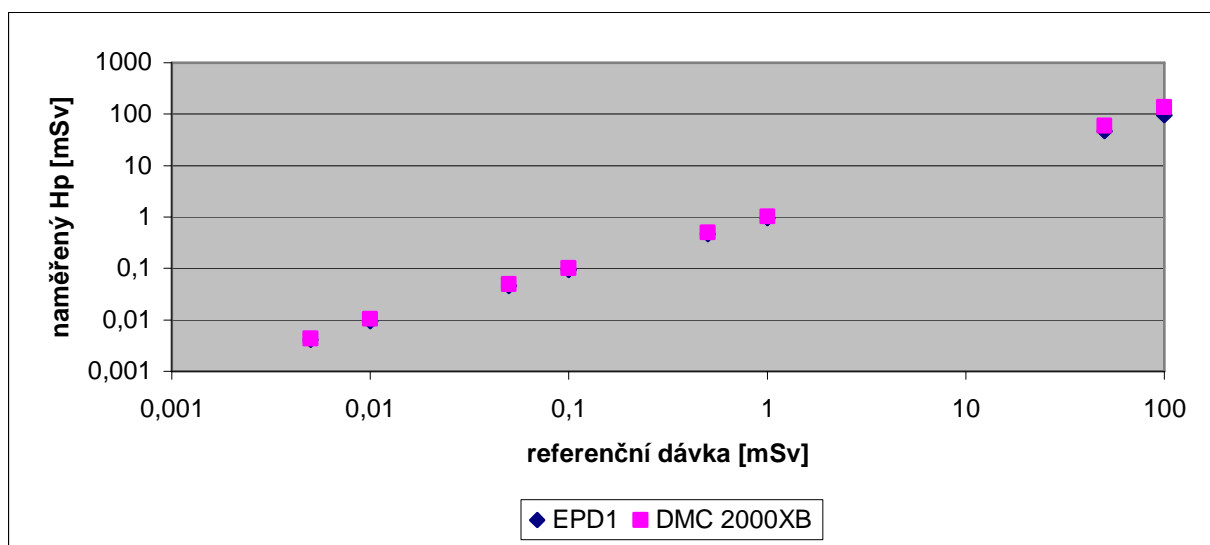
Poznámky: dozimetr č. 6 typu DMC 2000XB měřil chybně

Tab. 4.1.6: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R).100$	$(N_D/R).100$
0,005	0,0041	0,0043		
0,010	0,0094	0,0103	94	103
0,050	0,046	0,049	92	98
0,100	0,093	0,100	93	100
0,500	0,470	0,504	94	100,8
1	0,943	1,017		
50	47,241	59,458		
100	95,939	136,333		
		průměr	93,3	100,5

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.3: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z čela pod úhlem $\alpha = 0^\circ$ ve volném prostoru.

Tab. 4.1.7: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z pravého boku pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ ve volném prostoru. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,008	0,010	0,041	0,049	0,083	0,099	0,414	0,491
2	0,008	0,009	0,045	0,049	0,088	0,098	0,443	0,493
3	0,008	0,009	-	0,050	-	0,099	-	0,504
4	0,008	0,010	0,045	0,051	0,090	0,100	0,449	0,493
5	0,009	0,009	0,044	0,049	0,087	0,101	0,445	0,499
6	0,009	-	0,045	-	0,090	-	0,445	-
7	0,008	0,010	0,042	0,049	0,083	0,099	0,415	0,499
8	0,008	0,009	0,044	0,047	0,087	0,096	0,447	0,493
9	0,008	0,009	0,042	0,049	0,087	0,098	0,441	0,492
10	0,009	0,010	0,046	0,048	0,088	0,098	0,450	0,494
průměr	0,008	0,009	0,044	0,049	0,087	0,099	0,439	0,495
sm. odchylka	0,000	0,001	0,002	0,001	0,003	0,001	0,014	0,004
rel. sm. odchyl. [%]	5,820	5,580	3,920	2,282	2,930	1,433	3,200	0,874
odchylka [%]	-17,0	-5,6	-12,4	-2,0	-13,0	-1,3	-12,2	-0,9
p-hodnota F-test	0,795		0,247		0,116		0,003	
p-hodnota t-test	0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,001		0,005		0,012		0,057	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

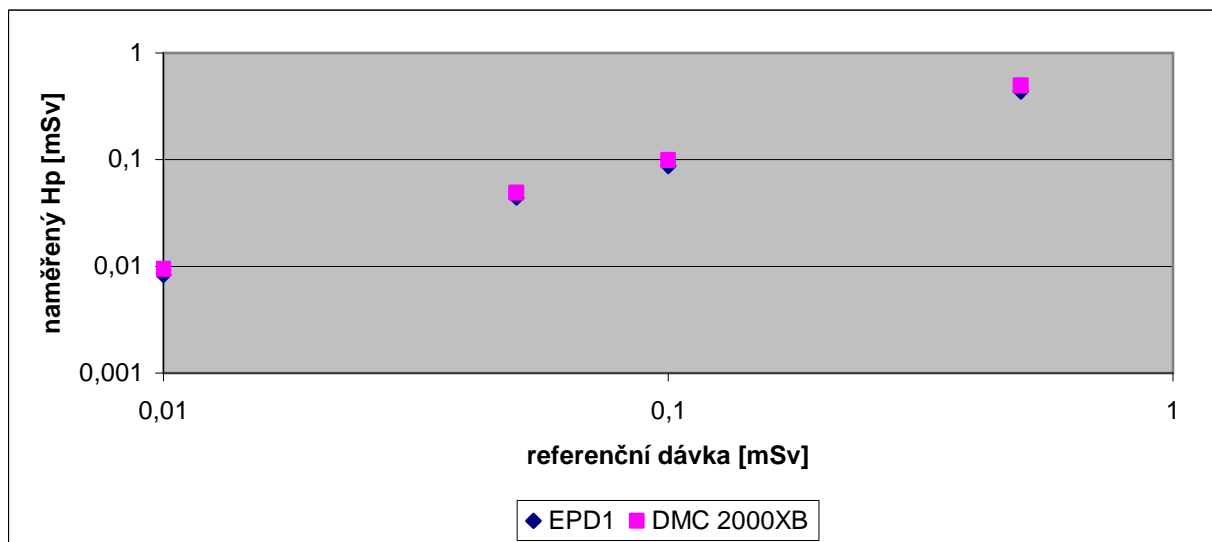
Poznámky: dozimetr č. 6 typu DMC 2000XB a dozimetr č. 3 EPD1 měřil chybně

Tab. 4.1.8: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R).100$	$(N_D/R).100$
0,010	0,0083	0,0094	83	94
0,050	0,044	0,049	88	98
0,100	0,087	0,099	87	99
0,500	0,439	0,495	87,8	99
	průměr		86,45	97,5

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.4: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z pravého boku pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ ve volném prostoru.

Tab. 4.1.9: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z pravého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ ve volném prostoru. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,005 mSv		0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv		1 mSv		50 mSv		100 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,002	0,004	0,006	0,008	0,029	0,045	0,057	0,093	0,308	0,451	0,593	0,933	31,21	55,40	65,60	125,10
2	0,002	0,005	0,006	0,009	0,031	0,046	0,062	0,091	0,355	0,456	0,724	0,919	36,11	57,08	66,48	130,20
3	0,003	0,005	0,008	0,009	0,039	0,047	0,078	0,094	0,323	0,494	0,637	0,996	36,51	58,56	70,95	129,00
4	0,003	0,004	0,008	0,009	0,040	0,045	0,079	0,090	0,377	0,410	0,718	1,001	35,62	52,99	69,34	124,10
5	0,003	0,004	0,008	0,009	0,037	0,044	0,072	0,090	0,343	0,425	0,651	0,958	36,18	52,21	67,79	121,10
6	0,003	-	0,007	-	0,035	-	0,069	-	0,352	-	0,732	-	31,07	-	76,73	-
7	0,003	0,004	0,007	0,011	0,035	0,047	0,070	0,095	0,356	0,462	0,765	0,935	35,06	57,61	79,41	133,90
8	0,003	0,004	0,008	0,010	0,038	0,048	0,076	0,099	0,350	0,456	0,663	0,914	37,78	54,34	78,36	131,50
9	0,003	0,004	0,007	0,009	0,038	0,046	0,076	0,096	0,363	0,458	0,731	0,981	35,75	58,26	66,09	121,50
10	0,003	0,004	0,006	0,010	0,036	0,044	0,072	0,087	0,335	0,468	0,692	0,942	35,52	53,38	62,51	118,20
průměr	0,003	0,004	0,007	0,009	0,036	0,046	0,071	0,093	0,346	0,453	0,691	0,953	35,081	55,537	70,326	126,067
sm. odchylka	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,001	0,007	0,004	0,020	0,024	0,053	0,033	2,201	2,421	5,888	5,348
rel. sm. odchyl. [%]	15,058	10,444	12,332	9,279	9,748	3,046	9,911	3,952	5,765	5,327	7,704	3,416	6,274	4,359	8,373	4,242
odchylka [%]	-44,0	-15,6	-29,0	-6,7	-28,4	-8,4	-28,9	-7,2	-30,8	-9,3	-30,9	-4,7	-29,8	11,1	-29,7	26,1
p-hodnota F-test	0,888		0,986		0,017		0,079		0,580		0,182		0,777		0,797	
p-hodnota t-test	0,000		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,001		0,002		0,010		0,022		0,107		0,263		20,456		55,741	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

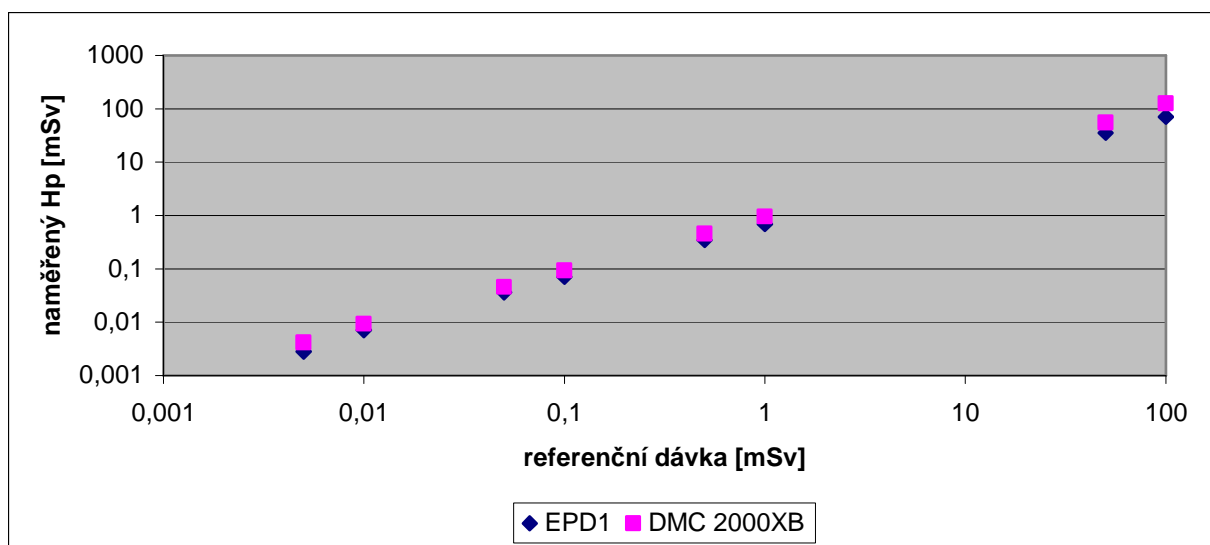
Poznámky: dozimetr č. 6 typu DMC 2000XB měřil chybně

Tab. 4.1.10: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R) \cdot 100$	$(N_D/R) \cdot 100$
0,005	0,0028	0,0042		
0,010	0,0071	0,0093	71	93
0,050	0,036	0,046	72	92
0,100	0,071	0,093	71	93
0,500	0,346	0,453	69,2	90,6
1	0,691	0,953		
50	35,081	55,537		
100	70,326	126,067		
		průměr	70,8	92,15

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.5: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z pravého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ ve volném prostoru.

Tab. 4.1.11: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované zezadu pod úhlem $\alpha = 180^\circ$ ve volném prostoru. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,006	0,008	0,034	0,046	0,068	0,090	0,341	0,451
2	0,007	0,008	0,037	0,045	0,075	0,089	0,368	0,449
3	-	0,009	-	0,045	-	0,091	-	0,460
4	0,007	0,008	0,038	0,045	0,077	0,088	0,381	0,444
5	0,007	0,009	0,037	0,047	0,073	0,090	0,370	0,453
6	0,008	0,009	0,038	0,046	0,072	0,092	0,373	0,461
7	0,006	0,009	0,034	0,045	0,067	0,089	0,333	0,447
8	0,007	0,009	0,040	0,045	0,078	0,090	0,389	0,452
9	0,006	0,009	0,037	0,044	0,075	0,090	0,374	0,444
10	0,007	0,008	0,038	0,045	0,074	0,093	0,371	0,456
průměr	0,007	0,009	0,037	0,045	0,073	0,090	0,367	0,452
sm. odchylka	0,001	0,001	0,002	0,001	0,004	0,001	0,018	0,006
rel. sm. odchyl. [%]	9,836	6,005	5,234	1,817	5,100	1,636	4,937	1,329
odchylka [%]	-32,2	-14,0	-26,0	-9,4	-26,8	-9,8	-26,7	-9,7
p-hodnota F-test	0,462		0,019		0,012		0,003	
p-hodnota t-test	0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,002		0,008		0,017		0,085	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

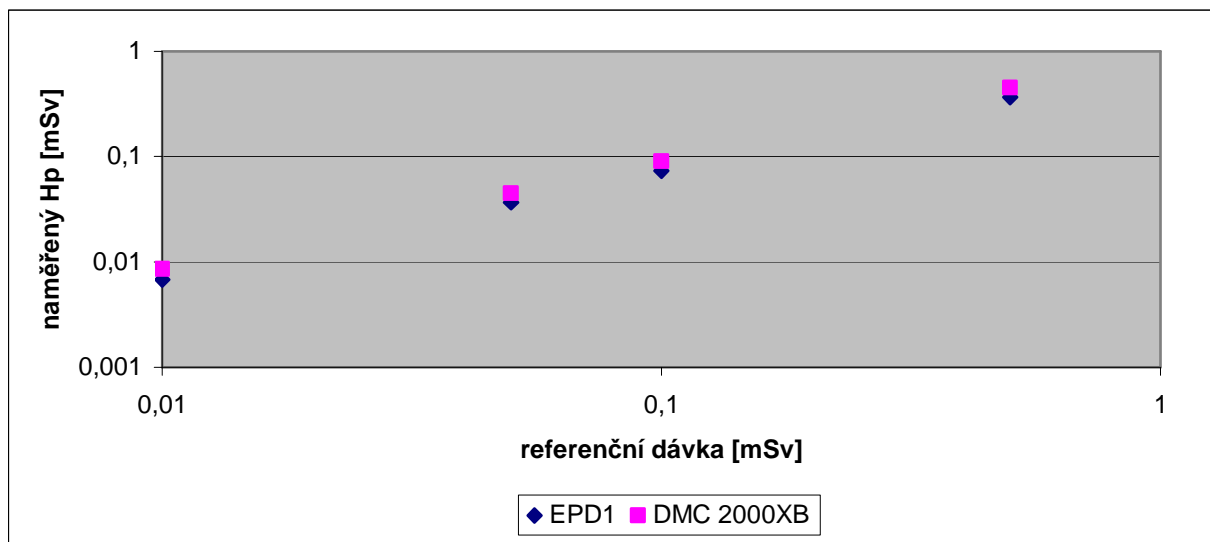
Poznámky: dozimetr č. 3 typu EPD1 měřil chybně

Tab. 4.1.12: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R) \cdot 100$	$(N_D/R) \cdot 100$
0,010	0,0068	0,0086	68	86
0,050	0,037	0,045	74	90
0,100	0,073	0,090	73	90
0,500	0,367	0,452	73,4	90,4
	průměr		72,1	89,1

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.6: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované zezadu pod úhlem $\alpha = 180^\circ$ ve volném prostoru.

Na fantomu

Tab. 4.1.13: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z levého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ na fantomu. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,005 mSv		0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv		1 mSv		50 mSv		100 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,004	0,004	0,007	0,008	0,038	0,047	0,076	0,086	0,389	0,389	0,798	0,927	40,06	46,93	84,21	100,70
2	0,004	0,005	0,008	0,008	0,041	0,044	0,083	0,077	0,436	0,393	0,895	0,943	44,62	47,37	93,54	113,10
3	0,004	0,004	0,009	0,008	0,042	0,045	0,084	0,079	0,442	0,421	0,908	0,942	45,7	55,29	95,44	109,90
4	0,004	0,004	0,009	0,008	0,045	0,044	0,088	0,076	0,463	0,393	0,945	0,845	47,51	54,04	99,43	110,50
5	0,004	0,004	0,009	0,008	0,043	0,046	0,085	0,078	0,446	0,394	0,925	0,804	46,58	55,34	97,60	111,60
6	0,004	0,005	0,008	-	0,044	-	0,084	-	0,441	-	0,937	-	46,09	-	97,53	-
7	0,004	0,005	0,008	0,008	0,043	0,047	0,083	0,082	0,418	0,405	0,879	0,861	43,28	52,15	93,06	124,20
8	0,004	0,004	0,009	0,008	0,044	0,047	0,085	0,079	0,45	0,414	0,947	0,842	46,53	52,53	99,50	114,30
9	0,004	0,004	0,009	0,007	0,042	0,045	0,084	0,08	0,43	0,397	0,938	0,852	45,57	55,28	98,16	111,40
10	0,004	0,005	0,009	0,008	0,043	0,045	0,083	0,079	0,435	0,38	0,926	0,789	45,94	55,37	99,22	104,10
průměr	0,004	0,004	0,009	0,008	0,043	0,046	0,084	0,080	0,435	0,398	0,910	0,867	45,188	52,700	95,769	111,089
sm. odchylka	0,000	0,001	0,001	0,000	0,002	0,001	0,003	0,003	0,020	0,013	0,045	0,057	2,139	3,378	4,684	6,568
rel. sm. odchyl. [%]	0,000	11,736	8,319	4,225	4,607	2,713	3,626	3,724	4,627	3,205	4,959	6,627	4,734	6,410	4,891	5,913
odchylka [%]	-20,0	-12,0	-15,0	-21,1	-15,0	-8,9	-16,5	-20,4	-13,0	-20,3	-9,0	-13,3	-9,6	5,4	-4,2	11,1
p-hodnota F-test	0,000		0,046		0,210		0,962		0,214		0,485		0,195		0,334	
p-hodnota t-test	0,037		0,029		0,001		0,011		0,000		0,089		0,000		0,000	
rozdíl průměrů	0,000		-0,001		0,003		-0,004		-0,037		-0,043		7,512		15,320	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

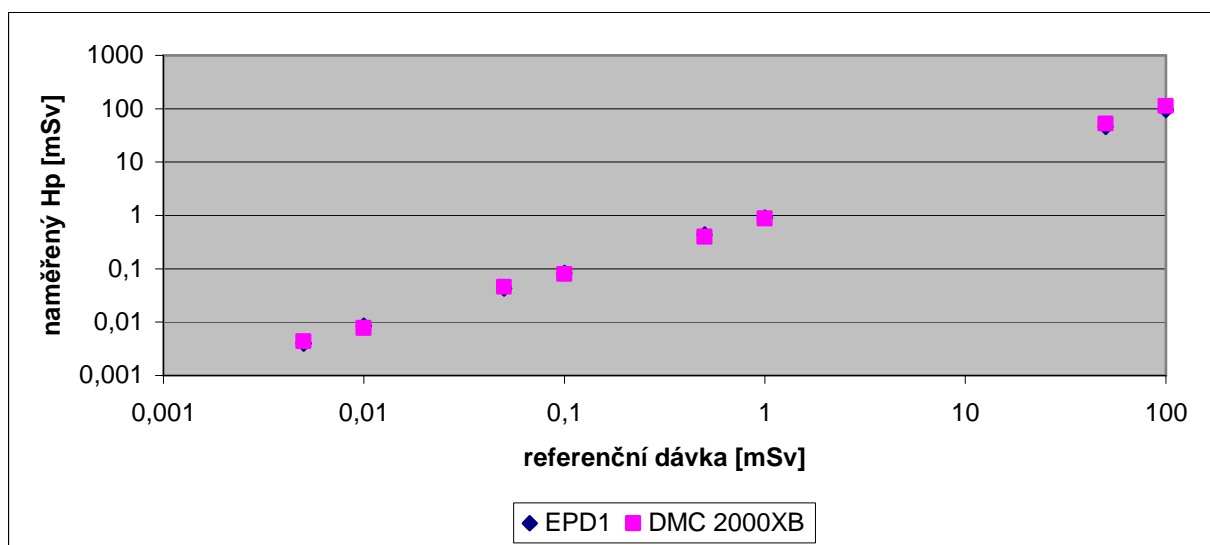
Poznámky: dozimetr č. 6 typu DMC 2000XB měřil chybně

Tab. 4.1.14: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R).100$	$(N_D/R).100$
0,005	0,0040	0,0044		
0,010	0,0085	0,0078	85	78
0,050	0,0425	0,0455	85	91
0,100	0,0835	0,0795	83,5	79,5
0,500	0,4350	0,3984	87	79,7
1	0,9098	0,8672		
50	45,1880	52,7000		
100	95,7690	111,0889		
		průměr	85,1	82,0

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.7: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z levého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ na fantomu.

Tab. 4.1.15: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z levého boku pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ na fantomu. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,009	0,009	0,044	0,051	0,087	0,103	0,441	0,516
2	0,009	0,010	0,046	0,052	0,094	0,101	0,467	0,528
3	-	0,010	-	0,053	-	0,105	-	0,535
4	0,009	0,010	0,048	0,051	0,095	0,103	0,486	0,515
5	0,009	0,010	0,046	0,051	0,093	0,103	0,475	0,518
6	0,009	-	0,046	-	0,095	-	0,470	-
7	0,008	0,010	0,044	0,052	0,090	0,107	0,458	0,533
8	0,009	0,010	0,047	0,052	0,094	0,104	0,474	0,521
9	0,009	0,010	0,046	0,052	0,093	0,104	0,475	0,523
10	0,008	0,010	0,047	0,050	0,095	0,103	0,477	0,517
průměr	0,009	0,010	0,046	0,052	0,093	0,104	0,469	0,523
sm. odchylka	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,002	0,013	0,007
rel. sm. odchyl. [%]	5,024	3,371	2,876	1,711	2,921	1,600	2,778	1,429
odchylka [%]	-12,2	-1,1	-8,0	3,1	-7,1	3,7	-6,2	4,6
p-hodnota F-test	0,446		0,272		0,185		0,136	
p-hodnota t-test	0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,001		0,006		0,011		0,054	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

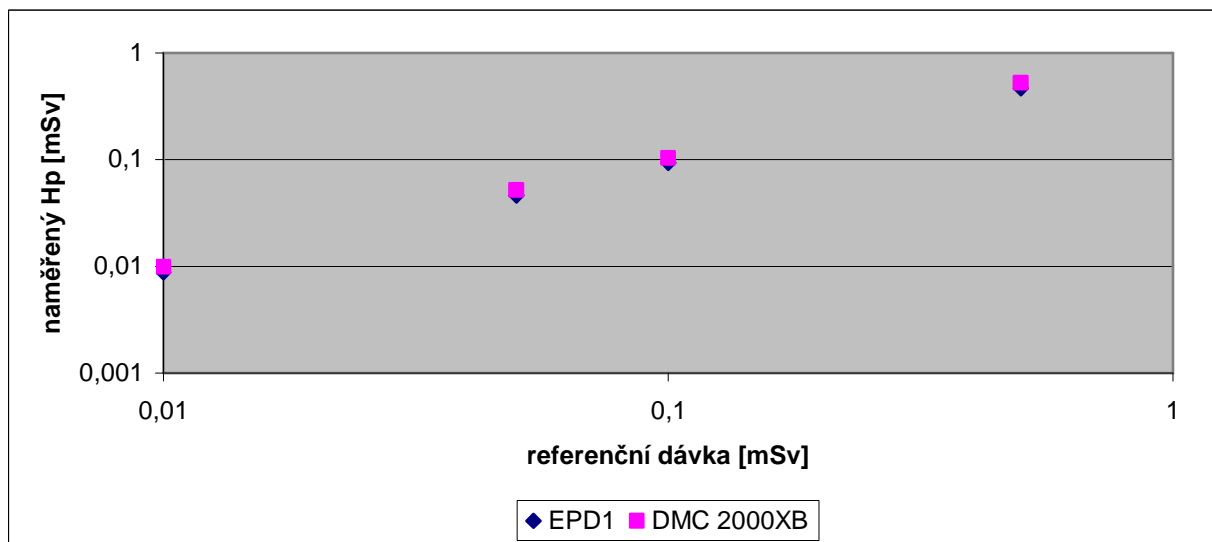
Poznámky: dozimetr č. 6 typu DMC 2000XB a dozimetr č. 3 typu EPD1 měřil chybně

Tab. 4.1.16: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R).100$	$(N_D/R).100$
0,010	0,0088	0,0099	88	99
0,050	0,046	0,052	92	104
0,100	0,093	0,104	93	104
0,500	0,469	0,523	93,8	104,6
	průměr		91,7	102,9

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.8: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z levého boku pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ na fantomu.

Tab. 4.1.17: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z čela pod úhlem $\alpha = 0^\circ$ na fantomu. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,005 mSv		0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv		1 mSv		50 mSv		100 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,004	0,005	0,009	0,011	0,046	0,053	0,093	0,107	0,485	0,551	0,974	1,121	49,40	67,14	104,3	158,2
2	0,005	0,007	0,010	0,011	0,050	0,052	0,100	0,107	0,507	0,544	1,064	1,124	53,34	68,30	108,3	173,2
3	0,005	0,005	0,011	0,011	0,048	0,053	0,099	0,107	0,523	0,553	1,055	1,140	53,58	68,83	111,7	154,1
4	0,005	0,005	0,010	0,010	0,049	0,054	0,099	0,106	0,526	0,535	1,064	1,107	52,53	67,06	113,3	160,8
5	0,005	0,005	0,010	0,011	0,048	0,051	0,098	0,106	0,510	0,529	1,038	1,128	52,49	64,19	110,0	155,7
6	0,005	0,005	0,010	0,011	0,048	0,054	0,098	0,105	0,520	0,547	1,052	1,114	51,68	67,04	107,8	157,7
7	0,004	0,005	0,009	0,011	0,047	0,053	0,098	0,107	0,502	0,551	1,049	1,141	52,05	68,81	105,9	166,9
8	0,004	0,005	0,010	0,011	0,049	0,051	0,098	0,107	0,521	0,548	1,037	1,104	51,81	64,68	110,1	160,4
9	0,005	0,006	0,010	0,010	0,048	0,051	0,099	0,104	0,508	0,549	1,047	1,100	52,07	66,85	106,9	155,7
10	0,005	0,005	0,010	0,011	0,049	0,051	0,101	0,101	0,510	0,547	1,038	1,080	53,17	65,84	108,9	160,8
průměr	0,005	0,005	0,010	0,011	0,048	0,052	0,098	0,106	0,511	0,545	1,042	1,116	52,212	66,874	108,720	160,350
sm. odchylka	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,012	0,008	0,026	0,019	1,185	1,593	2,693	5,796
rel. sm. odchyl. [%]	10,278	12,735	5,734	3,904	2,355	2,393	2,147	1,842	2,381	1,400	2,477	1,694	2,270	2,382	2,477	3,615
odchylka [%]	-6,0	6,0	-1,0	8,0	-3,6	4,6	-1,7	5,7	2,2	9,1	4,2	11,6	4,4	33,7	8,7	60,4
p-hodnota F-test	0,333		0,389		0,776		0,813		0,181		0,367		0,392		0,032	
p-hodnota t-test	0,035		0,001		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,001		0,001		0,004		0,007		0,034		0,074		14,662		51,630	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

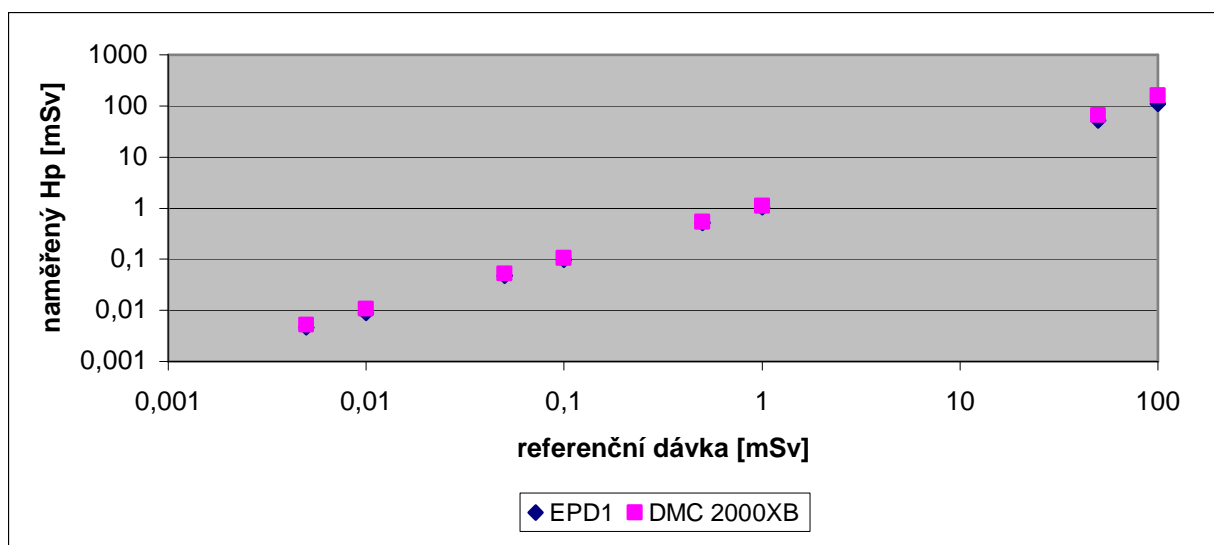
rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

Tab. 4.1.18: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R).100$	$(N_D/R).100$
0,005	0,0047	0,0053		
0,010	0,0090	0,0108	90	108
0,050	0,0482	0,0523	96,4	104,6
0,100	0,0983	0,1057	98,3	105,7
0,500	0,511	0,5454	102,2	109,1
1	1,0418	1,1159		
50	52,2120	66,8740		
100	108,7200	160,3500		
		průměr	96,7	106,8

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.9: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z čela pod úhlem $\alpha = 0^\circ$ na fantomu.

Tab. 4.1.19: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z pravého boku pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ na fantomu. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,008	0,010	0,045	0,052	0,085	0,102	0,441	0,519
2	0,009	0,010	0,047	0,053	0,093	0,105	0,477	0,539
3	-	0,011	-	0,054	-	0,106	-	0,547
4	0,010	0,010	0,046	0,051	0,094	0,106	0,480	0,537
5	0,009	0,011	0,046	0,051	0,093	0,107	0,473	0,534
6	0,009	-	0,047	-	0,094	-	0,478	-
7	0,008	0,010	0,044	0,050	0,087	0,103	0,446	0,521
8	0,009	0,010	0,046	0,052	0,093	0,099	0,479	0,518
9	0,009	0,011	0,047	0,050	0,094	0,103	0,476	0,534
10	0,009	0,010	0,046	0,052	0,094	0,102	0,478	0,524
průměr	0,009	0,010	0,046	0,052	0,092	0,104	0,470	0,530
sm. odchylka	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003	0,015	0,010
rel. sm. odchyl. [%]	6,760	4,839	2,174	2,560	3,708	2,459	3,210	1,923
odchylka [%]	-11,1	3,3	-8,0	3,3	-8,1	3,7	-6,0	6,1
p-hodnota F-test	0,615		0,446		0,430		0,289	
p-hodnota t-test	0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,001		0,006		0,012		0,061	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

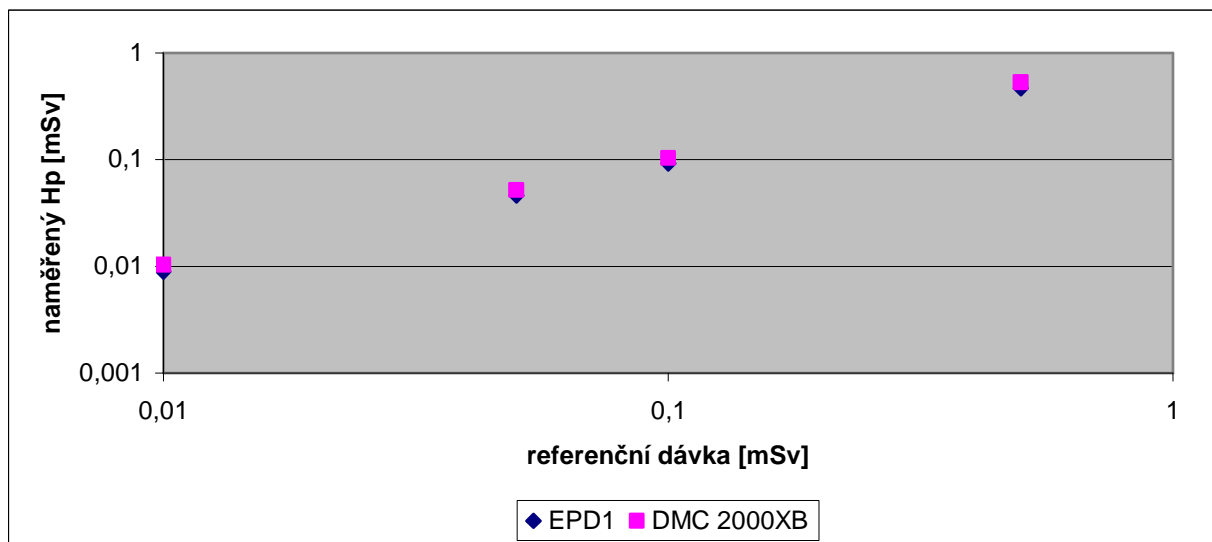
Poznámky: dozimetr č. 6 typu DMC 2000XB a dozimetr č. 3 typu EPD1 měřil chybně

Tab. 4.1.20: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R).100$	$(N_D/R).100$
0,010	0,0089	0,0103	89	103
0,050	0,046	0,052	92	104
0,100	0,092	0,104	92	104
0,500	0,470	0,530	94	106
	průměr		91,8	104,3

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.10: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z pravého boku pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ na fantomu.

Tab. 4.1.21: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z pravého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ na fantomu. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,005 mSv		0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv		1 mSv		50 mSv		100 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,003	0,005	0,006	0,01	0,036	0,045	0,073	0,093	0,38	0,482	0,765	0,971	37,98	57,86	81,79	135,50
2	0,004	0,005	0,007	0,01	0,04	0,049	0,079	0,095	0,417	0,498	0,863	1,014	39,94	62,43	93,36	152,80
3	0,004	0,005	0,007	0,01	0,043	0,048	0,08	0,098	0,407	0,511	0,826	1,04	41,51	62,71	85,46	147,90
4	0,004	0,006	0,009	0,011	0,044	0,046	0,082	0,097	0,402	0,505	0,837	1,045	42,52	61,45	90,67	145,10
5	0,005	0,005	0,008	0,01	0,042	0,046	0,077	0,095	0,403	0,501	0,798	1,028	41,18	60,85	86,10	139,70
6	0,004	0,005	0,009	-	0,041	-	0,068	-	0,351	-	0,715	-	34,13	-	71,57	-
7	0,004	0,005	0,009	0,01	0,039	0,048	0,073	0,097	0,377	0,524	0,67	1,069	34,13	65,14	74,44	158,00
8	0,005	0,005	0,009	0,01	0,04	0,047	0,08	0,094	0,428	0,506	0,769	1,042	42,23	62,46	86,80	149,40
9	0,004	0,005	0,009	0,009	0,04	0,045	0,078	0,095	0,423	0,514	0,791	1,034	41,99	61,51	86,24	145,50
10	0,004	0,004	0,009	0,01	0,04	0,047	0,082	0,095	0,434	0,503	0,87	1,021	39,36	60,62	84,38	144,20
průměr	0,004	0,005	0,008	0,010	0,041	0,047	0,077	0,095	0,402	0,505	0,790	1,029	39,497	61,670	84,081	146,456
sm. odchylka	0,001	0,000	0,001	0,001	0,002	0,001	0,005	0,002	0,026	0,012	0,064	0,027	3,159	1,959	6,686	6,688
rel. sm. odchyl. [%]	13,845	9,428	13,845	5,000	5,490	2,981	5,882	1,666	6,474	2,298	8,045	2,621	7,999	3,176	7,952	4,566
odchylka [%]	-18,0	0,0	-18,0	0,0	-19,0	-6,4	-22,8	-4,6	-19,6	1,0	-21,0	2,9	-21,0	23,3	-15,9	46,5
p-hodnota F-test	0,589		0,030		0,203		0,007		0,033		0,024		0,193		0,989	
p-hodnota t-test	0,001		0,001		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,001		0,002		0,006		0,018		0,103		0,239		22,173		62,375	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

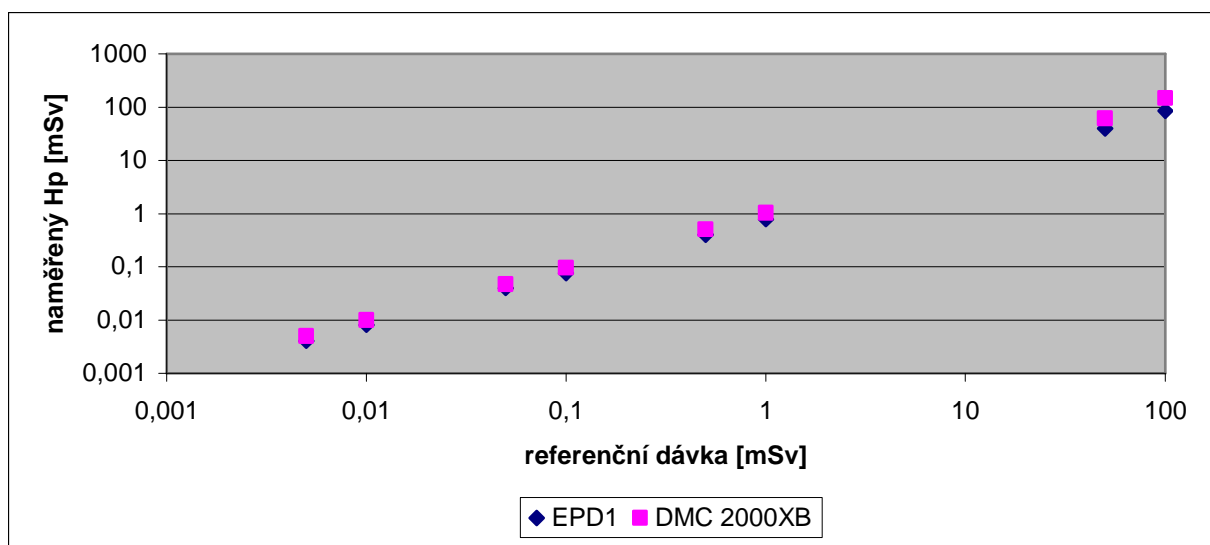
Poznámky: dozimetr č. 6 typu DMC 2000XB měřil chybně

Tab. 4.1.22: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka- R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R).100$	$(N_D/R).100$
0,005	0,0041	0,005		
0,010	0,0082	0,01	82	100
0,050	0,0405	0,0468	81	93,5
0,100	0,0772	0,0954	77,2	95,4
0,500	0,4022	0,5048	80,4	101,0
1	0,7904	1,0293		
50	39,4970	61,6700		
100	84,0810	146,4556		
		průměr	80,2	97,5

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.11: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované z pravého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ na fantomu.

Tab. 4.1.23: Naměřené odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované zezadu pod úhlem $\alpha = 180^\circ$ na fantomu. Naměřené hodnoty $H_p(10)$ jsou uvedeny v mSv.

	0,010 mSv		0,050 mSv		0,100 mSv		0,500 mSv	
	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC	EPD1	DMC
1	0,007	0,010	0,038	0,049	0,076	0,100	0,371	0,501
2	0,008	0,010	0,042	0,047	0,082	0,098	0,424	0,502
3	-	0,010	-	0,049	-	0,098	-	0,516
4	0,008	0,009	0,044	0,048	0,088	0,096	0,452	0,504
5	0,008	0,011	0,042	0,051	0,082	0,097	0,423	0,511
6	0,008	0,010	0,041	0,049	0,084	0,101	0,424	0,518
7	0,008	0,010	0,039	0,050	0,076	0,098	0,396	0,513
8	0,008	0,011	0,040	0,050	0,081	0,100	0,444	0,510
9	0,008	0,010	0,041	0,049	0,080	0,099	0,416	0,510
10	0,008	0,010	0,041	0,051	0,083	0,101	0,423	0,507
průměr	0,008	0,010	0,041	0,049	0,081	0,099	0,419	0,509
sm. odchylka	0,000	0,001	0,002	0,001	0,004	0,002	0,024	0,006
rel. sm. odchyl. [%]	4,225	5,620	4,314	2,539	4,641	1,707	5,743	1,122
odchylka [%]	-21,1	1,0	-18,2	-1,4	-18,7	-1,2	-16,2	1,8
p-hodnota F-test	0,149		0,327		0,027		0,000	
p-hodnota t-test	0,000		0,000		0,000		0,000	
rozdíly průměrů	0,002		0,008		0,017		0,090	

sm. odchylka - směrodatná odchylka

rel. sm. odchyl. [%] - relativní směrodatná odchylka, vypočtená jako podíl příslušné sm. odchylky a průměru a vynásobená 100

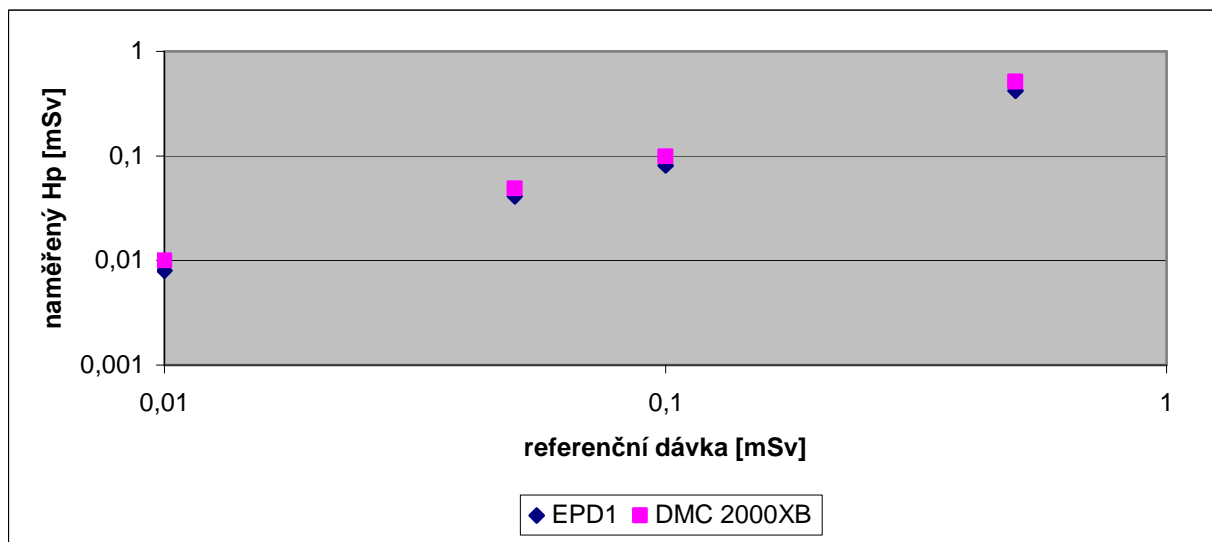
Poznámky: dozimetr č. 3 typu EPD1 měřil chybně

Tab. 4.1.24: Průměrné naměřené odezvy a podíl naměřených hodnot a referenčních dávek vyjádřený v procentech.

referenční dávka - R	N_E (průměr)	N_D (průměr)	$(N_E/R).100$	$(N_D/R).100$
0,010	0,008	0,010	80	100
0,050	0,041	0,049	82	98
0,100	0,081	0,099	81	99
0,500	0,419	0,509	83,8	101,8
	průměr		81,7	99,7

N_E – naměřená hodnota EPD1

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 4.1.12: Naměřené průměrné odezvy osobních dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB ozařované zezadu pod úhlem $\alpha = 180^\circ$ na fantomu.

4.2 Energetická závislost

Energie ozařování rentgenem byly: 16 keV, 33 keV, 48 keV, 65 keV, 83 keV, 100 keV, 118 keV a 164 keV. Hodnota 662 keV se ozařovala zářičem ^{137}Cs a 1250 keV zářičem ^{60}Co . Ozařování probíhalo na PMMA fantomu 30 x 30 x 15 cm.

4.2.1 Energetická závislost dozimetru typu EPD1

Tab. 4.2.1.1: Naměřená odezva EPD1 po ozáření zářičem ^{137}Cs a ^{60}Co .

dozimetr	pozadí [mSv]	^{137}Cs - 662 keV	^{60}Co - 1250 keV
		odezva [mSv]	odezva [mSv]
1	8,229	1,011	0,910
2	-	-	-
3	8,669	1,022	0,929
4	8,582	1,025	0,913
5	8,358	1,006	0,906
průměrná dávka		1,016	0,915
směrodatná odchylka		0,454	0,409
relativní sm. odchylka [%]		44,728	44,732
odchylka [%]		1,6	-8,6

Poznámky: příkon 15 mSv/h, doba měření 240 s
zářič G7-7 (^{137}Cs), vzdálenost 1,434 m
zářič G7-5 (^{60}Co), vzdálenost 5,205 m
dozimetr č. 2 měřil chybně

Tab. 4.2.1.2: V tabulce jsou uvedena specifika ozařování rentgenem.

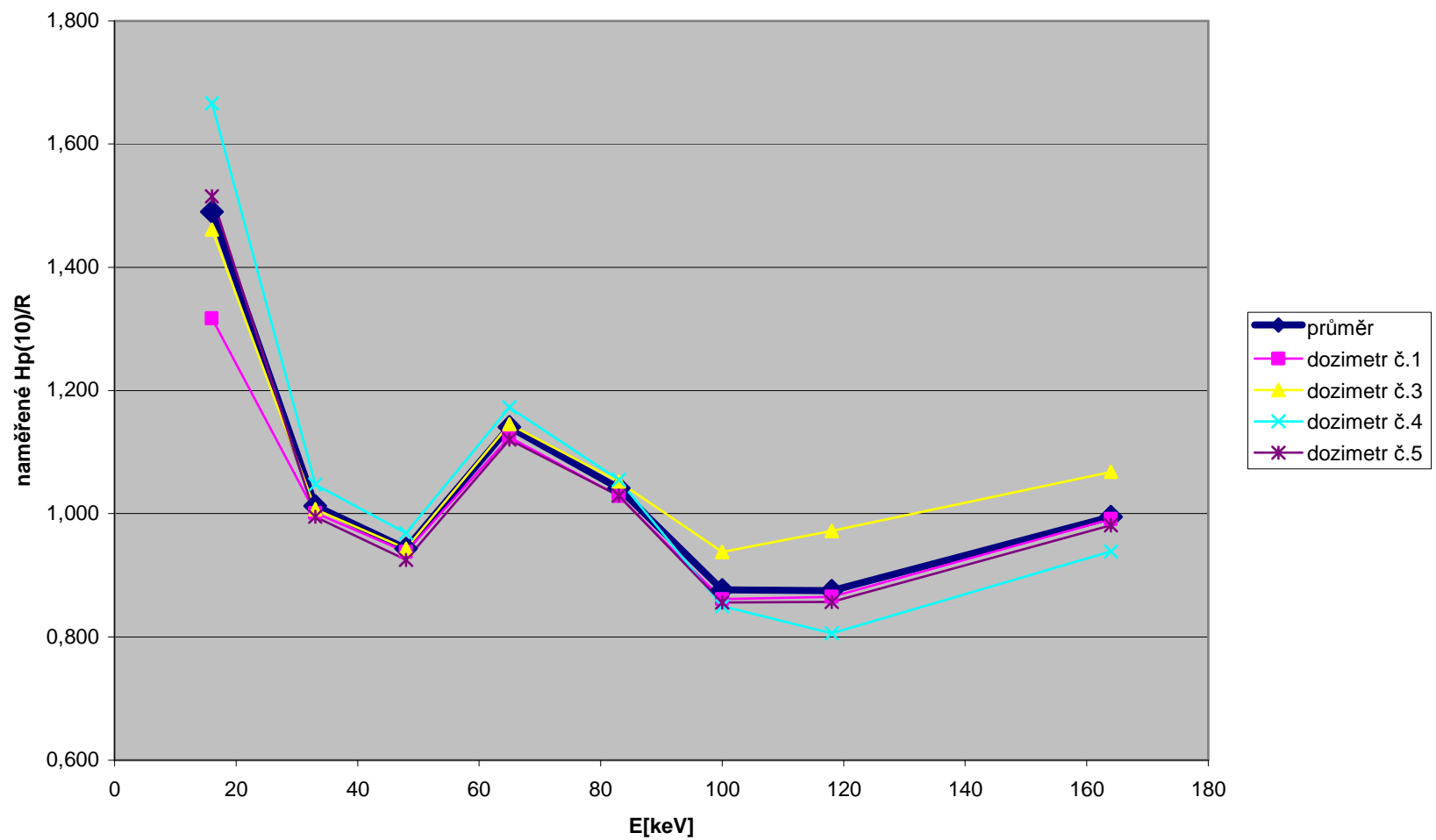
E[keV]	I [A]	čas [s]	$k_{p,t}$	referenční dávka - R [mSv]
16	2,00E-02	265	1,0088	1
33	1,50E-02	200		
48	7,00E-03	198		
65	1,00E-02	226		
83	2,00E-02	237		
100	2,00E-02	224		
118	3,00E-03	213		
164	1,00E-02	189		

I [A] – elektrický proud; $k_{p,t}$ – korekce tlaku a teploty

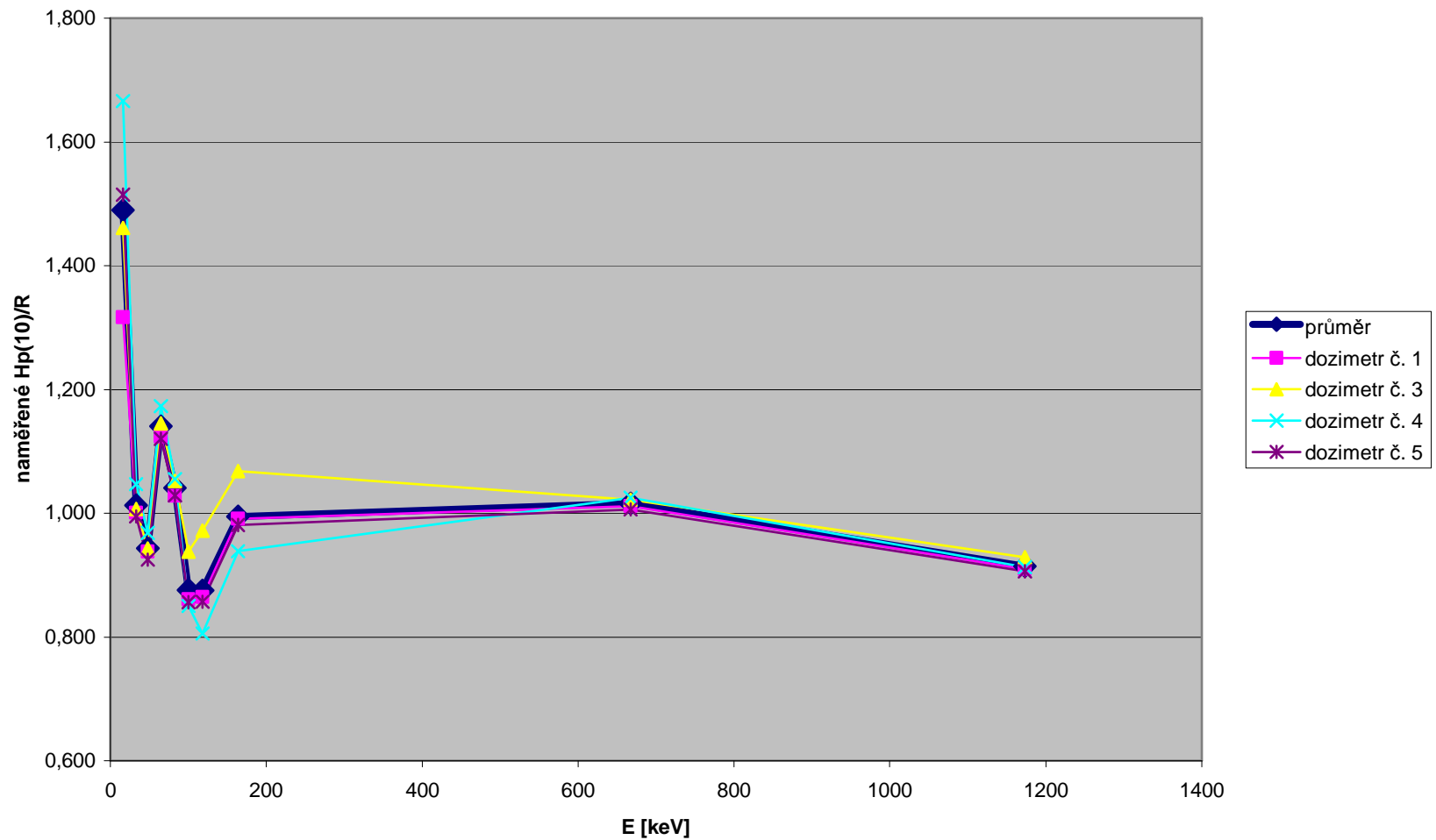
Tab. 4.2.1.3: Naměřená odezva EPD1 po ozáření rentgenem.

dozimetr	pozadí [μSv]	16 keV odezva [mSv]	33 keV odezva [mSv]	48 keV odezva [mSv]	65 keV odezva [mSv]	83 keV odezva [mSv]	100 keV odezva [mSv]	118 keV odezva [mSv]	164 keV odezva [mSv]
1	104	1,317	1,001	0,938	1,124	1,028	0,861	0,865	0,991
2	36	-	-	-	-	-	-	-	-
3	83	1,461	1,007	0,943	1,145	1,052	0,938	0,972	1,068
4	78	1,666	1,047	0,968	1,173	1,055	0,85	0,806	0,939
5	80	1,515	0,995	0,925	1,12	1,029	0,856	0,857	0,981
průměrná dávka		1,490	1,013	0,944	1,141	1,041	0,876	0,875	0,995
směrodatná odchylka		0,678	0,453	0,422	0,510	0,466	0,394	0,396	0,447
relativní sm. odchylka [%]		45,500	44,767	44,752	44,759	44,738	44,908	45,251	44,966
odchylka [%]		49	1,3	-5,6	14,1	4,1	-12,4	-12,5	-0,5

Energetická závislost (dozimetr EPD1)



Energetická závislost (dozimetr EPD1, v grafu i Cs-137 a Co-60)



4.2.2 Energetická závislost dozimetru typu DMC 2000XB

Tab. 4.2.2.1: Naměřená odezva DMC 2000XB po ozáření zářičem ^{137}Cs a ^{60}Co .

dozimetr	pozadí [mSv]	^{137}Cs - 667 keV odezva [mSv]	^{60}Co - 1173,23 keV odezva [mSv]
1	0	1,039	0,943
2	0	1,045	0,94
3	0	1,056	0,965
4	0	1,024	0,938
5	0	1,048	0,952
průměrná dávka		1,042	0,948
směrodatná odchylka		0,012	0,011
relativní sm. odchylka [%]		1,148	1,172
odchylka [%]		4,2	-5,2

Poznámky: příkon 15 mSv/h, doba měření 240 s

zářič G7-7 (^{137}Cs), vzdálenost 1,434 m

zářič G7-5 (^{60}Co), vzdálenost 5,205 m

Tab. 4.2.2.2: V tabulce jsou uvedena specifika ozařování rentgenem.

E[keV]	I [A]	čas [s]	$k_{p,t}$	referenční dávka - R [mSv]
16	1,00E-02	433	1,0146	1
33	1,00E-02	244		
48	5,00E-03	225		
65	1,00E-02	184		
83	2,00E-02	193		
100	2,00E-02	183		
118	3,00E-03	156		
164	1,00E-02	154		

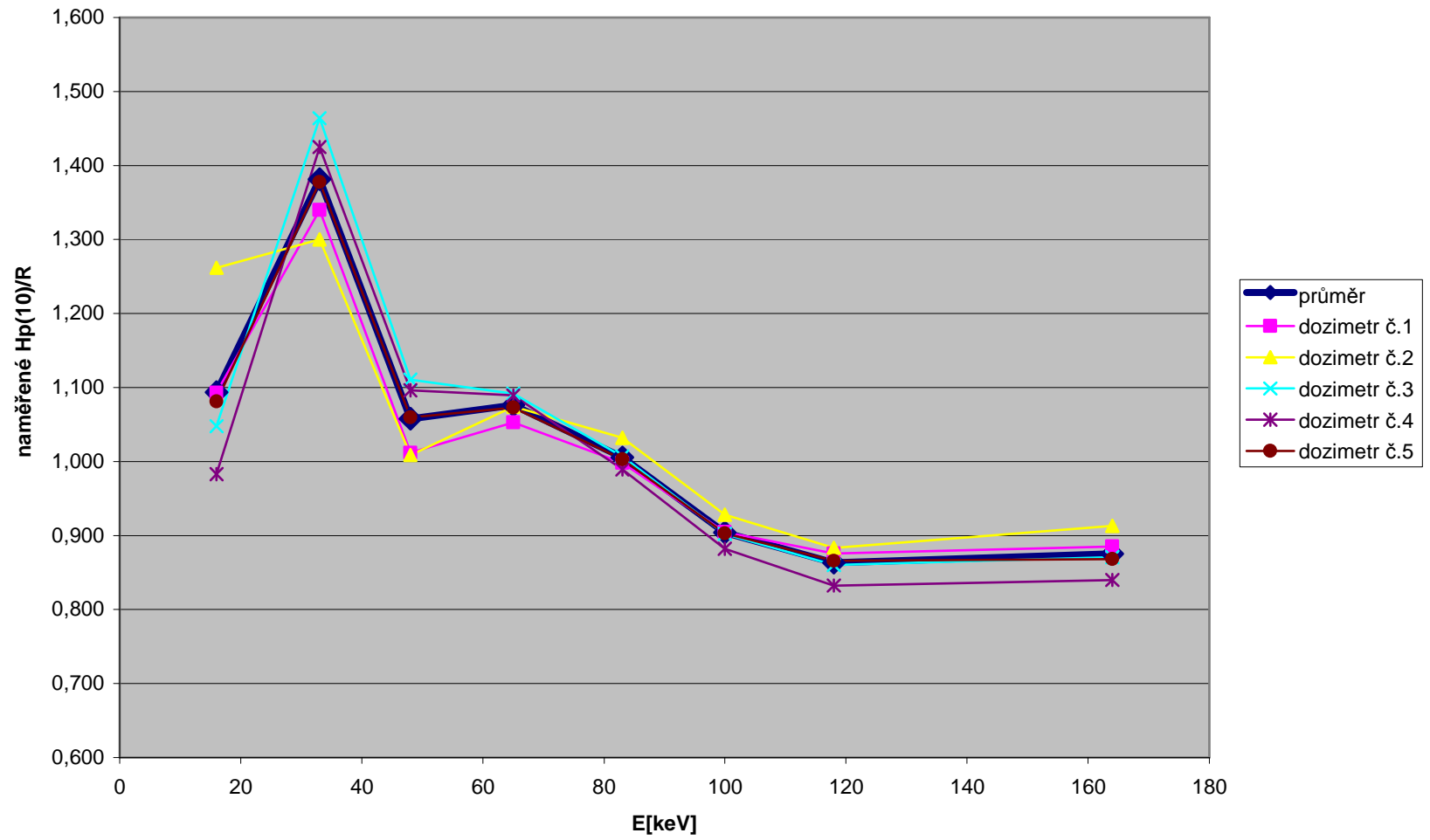
I [A] – elektrický proud

$k_{p,t}$ – korekce tlaku a teploty

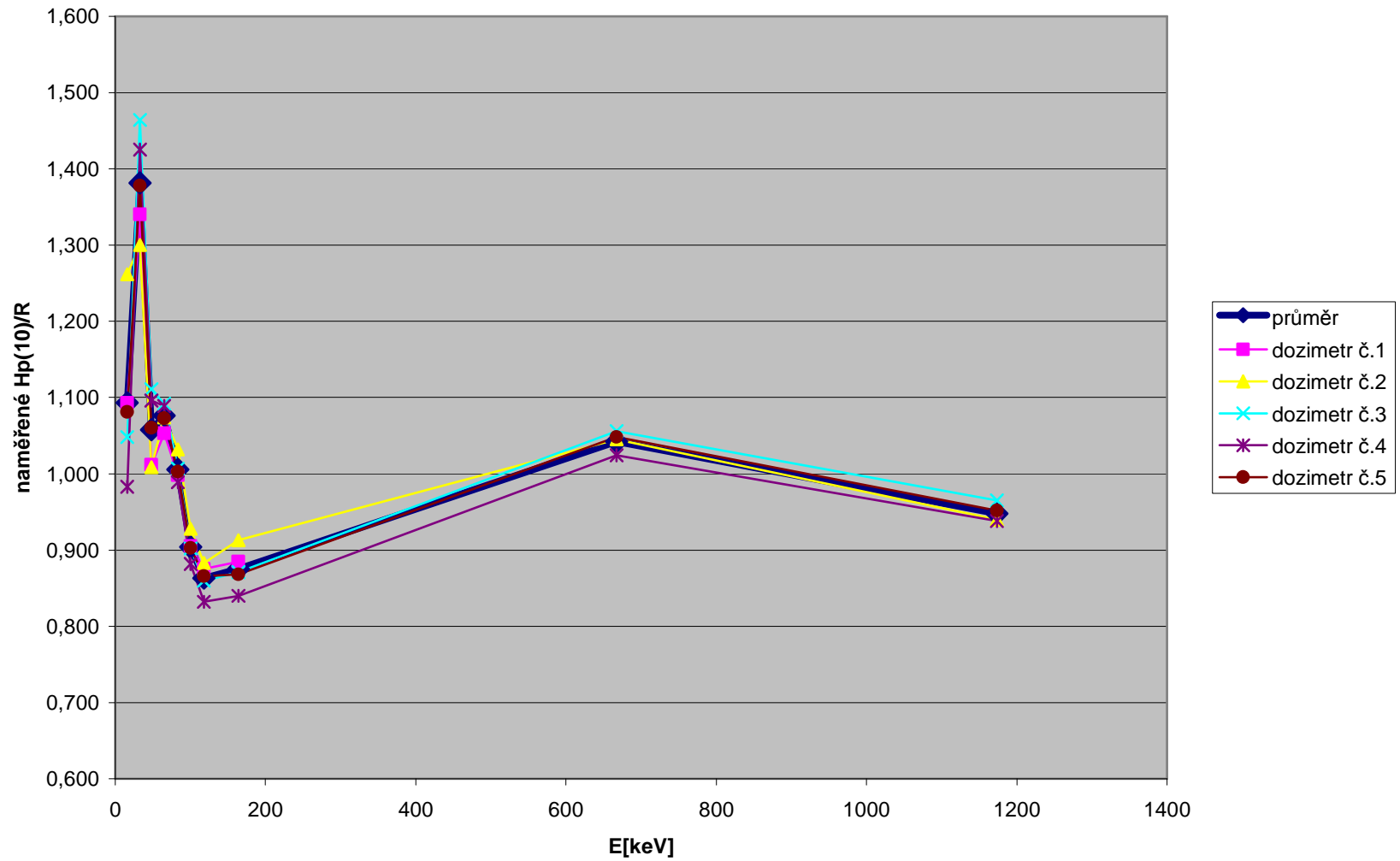
Tab. 4.2.2.3: Naměřená odezva DMC 2000XB po ozáření rentgenem.

dozimetr	pozadí [mSv]	16 keV odezva [mSv]	33 keV odezva [mSv]	48 keV odezva [mSv]	65 keV odezva [mSv]	83 keV odezva [mSv]	100 keV odezva [mSv]	118 keV odezva [mSv]	164 keV odezva [mSv]
1	0,002	1,093	1,34	1,012	1,053	0,998	0,905	0,876	0,885
2	0,002	1,262	1,3	1,009	1,074	1,032	0,928	0,883	0,913
3	0,003	1,048	1,464	1,111	1,092	1,007	0,902	0,860	0,871
4	0,002	0,983	1,425	1,096	1,089	0,989	0,882	0,832	0,84
5	0,003	1,081	1,378	1,06	1,073	1,003	0,903	0,866	0,868
průměrná dávka		1,093	1,381	1,058	1,076	1,006	0,904	0,863	0,875
směrodatná odchylka		0,103	0,065	0,047	0,016	0,016	0,016	0,020	0,027
relativní sm. odchylka [%]		9,464	4,730	4,428	1,445	1,602	1,806	2,268	3,040
odchylka [%]		9,3	38,1	5,8	7,6	0,6	-9,6	-13,7	-12,5

Energetická závislost (dozimetr DMC 2000XB)



Energetická závislost (dozimetr DMC 2000XB,v grafu i Cs-137 a Co-60)



5. Diskuze

5.1 Dávková závislost

K posouzení dávkové závislosti se 10 dozimetrů typu EPD1 firmy Siemens a 10 dozimetrů typu DMC 2000XB firmy MGP Instruments ozařovalo těmito hodnotami osobního dávkového ekvivalentu: 0,005 mSv, 0,010 mSv, 0,050 mSv, 0,100 mSv, 0,500 mSv, 1 mSv, 50 mSv, 100 mSv. Ozařování probíhalo s dozimetry umístěnými na fantomu (tkáni ekvivalentní kvádr, který absorpcí a rozptylem záření dostatečně simuluje lidské tělo) i samostatně bez něj.

V tabulkách v podkapitole 4.1 jsou uvedené výsledky měření a k nim vypočteny průměrné odezvy, směrodatné odchylky, pro lepší porovnání i relativní směrodatná odchylka vyjádřená v procentech, procentuální odchylka naměřené dávky od referenční, p-hodnota F testu, p-hodnota t testu a nakonec rozdíl průměrů dozimetrů DMC 2000XB a EPD1. Výpočty jsou provedeny pro všechny směry s dozimetry umístěnými na fantomu i ve volném prostoru. Pro stanovení dávkové závislosti použiji pouze výsledky měření zřepředu pod úhlem $\alpha = 0^\circ$.

Pro zhodnocení jsem mimo jiné použila statistickou metodu dvouvýběrový t test. Tuto metodu jsem zvolila, abych byla schopna vyvrátit nebo potvrdit své hypotézy. Zadaná nulová hypotéza zněla: $H_0 =$ rozdíl mezi dozimetry EPD1 a DMC 2000XB je nulový. V tabulkách vložená p-hodnota t testu se dále porovnává s hladinou významnosti α . Pokud je vypočtená p-hodnota t testu menší než zvolená mezní hodnota α , tedy hladina významnosti, kterou jsem v tomto případě volila $\alpha = 0,05$ (neboli 5 %), zamítneme nulovou hypotézu. Po zamítnutí nulové hypotézy přijmeme hypotézu alternativní, která říká, že rozdíl mezi dozimetry EPD1 a DMC 2000XB není nulový - jeden se ukazuje být prokazatelně lepší.

Dávková závislost po ozáření ve volném prostoru

Výsledky měření jsou uvedeny v podkapitole 4.1 v tabulce 4.1.5 Po ozáření obou typů dozimetrů zřepředu ve volném prostoru byla výsledná p-hodnota t testu u většiny dávek menší než hladina významnosti α a došlo k zamítnutí nulové hypotézy.

Pouze u referenční dávky 0,005 mSv vyšla p-hodnota t testu 0,236, tedy vyšší než zvolená hladina významnosti a nulová hypotéza se v tomto případě přijímá- po ozáření dávkou 0,005 mSv oba typy dozimetrů měří stejně. Dozimetry EPD1 naměřily hodnotu pro průměrný dávkový ekvivalent $H_p(10)$ 0,0041 mSv a odezva od DMC 2000XB byla 0,0043 mSv.

Dávková závislost po ozáření na fantomu

V podkapitole 4.1 v tabulce 4.1.17 jsou vloženy výsledky měření. Po ozáření dozimetru zředu pod úhlem $\alpha = 0^\circ$ byla hodnota t testu pro všechny odezvy menší než hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Pro všechny dávky tedy zamítáme nulovou hypotézu, která říká, že dozimetr typu EPD1 a typu DMC 2000XB měří stejně.

Rozdíly průměrných dávek DMC 2000XB a EPD1

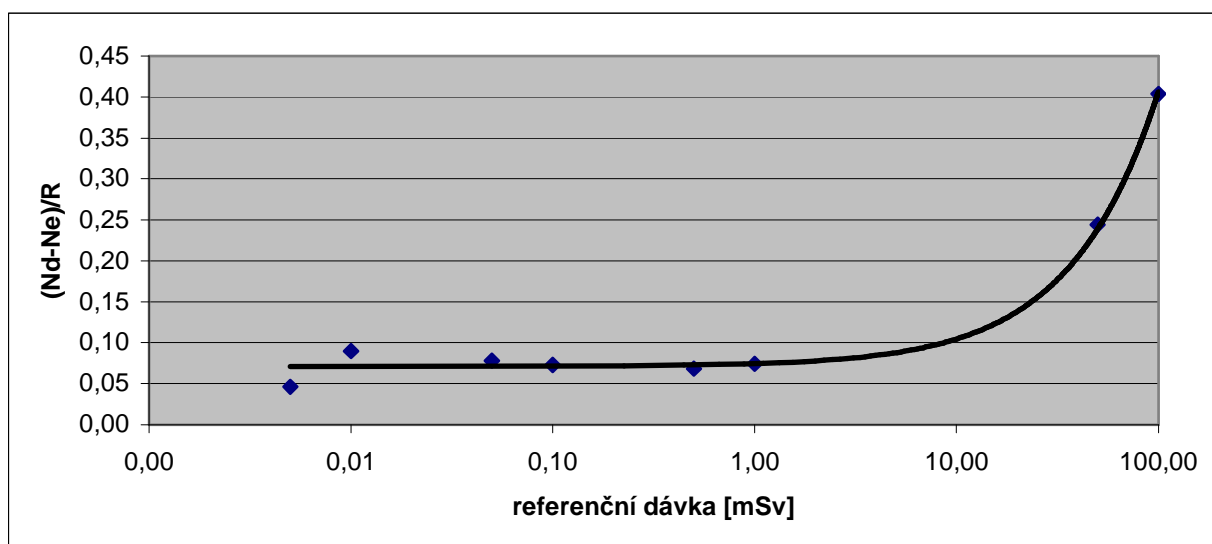
U všech dávek, kromě jedné (0,005 mSv bez fantomu), měří dozimetry EPD1 a DMC 2000XB odlišně (podle metody t test). Pro toto porovnání jsou v tabulkách s výsledky měření vypočteny rozdíly průměrů, které by za předpokladu, že oba typy měří stejně, obsahovaly nulové hodnoty.

V následujících tabulkách a grafech jsou tyto rozdíly znázorněny. V grafech na ose x jsou hodnoty rozdílu řádu, a proto vynesené body nebyly dobře viditelné a překrývaly se. Pro přehlednější zobrazení bodů jsem ve formátu osy využila logaritmické měřítko. Osy jsem poté musela upravit, posunout je tak, že osa y protíná osu x v malé hodnotě 0,000000001 (místo bodu 0).

Tab. 5.1.1: Rozdíly průměrných naměřených odezev dozimetrů DMC 2000XB a EPD1 po ozáření ve volném prostoru.

referenční dávka- R [mSv]	rozdíl průměrů (N_D-N_E)	$(N_D-N_E)/R$
0,005	0,0002	0,046
0,010	0,001	0,090
0,050	0,004	0,078
0,100	0,007	0,073

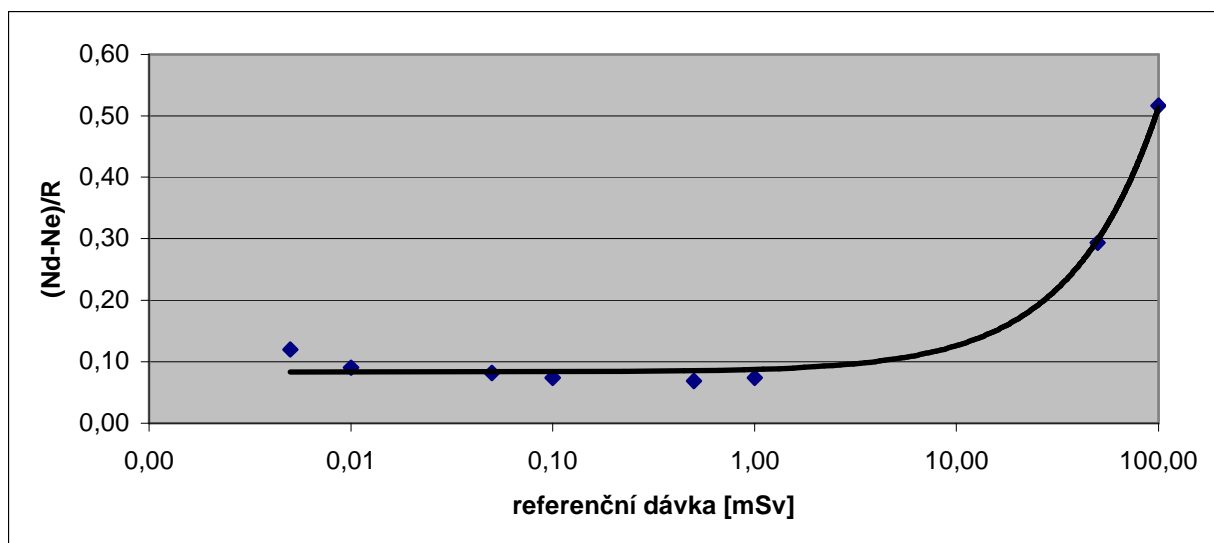
referenční dávka- R [mSv]	rozdíl průměrů (N_D-N_E)	$(N_D-N_E)/R$
0,500	0,034	0,068
1	0,074	0,074
50	12,217	0,244
100	40,394	0,404



Graf 5.1.1: Rozdíly průměrných naměřených odezví dozimetrů DMC 2000XB a EPD1 po ozáření ve volném prostoru.

Tab. 5.1.2: Rozdíly průměrných naměřených odezví dozimetrů DMC 2000XB a EPD1 po ozáření na fantomu.

referenční dávka- R	rozdíl průměrů (N_D-N_E)	$(N_D-N_E)/R$
0,005	0,001	0,120
0,010	0,001	0,090
0,050	0,004	0,082
0,100	0,007	0,074
0,500	0,034	0,068
1,00	0,074	0,074
50,00	14,662	0,293
100,00	51,630	0,516



Graf 5.1.2: Rozdíly průměrných naměřených odezev dozimetřů DMC 2000XB a EPD1 po ozáření na fantomu.

Při ozáření nízkými hodnotami referenčních dávek rozdíl měření dozimetřů není příliš patrný, jak lze pozorovat na spojnici trendu u grafu č. 5.1.1 a 5.1.2. Přibližně od dávek nad 10 mSv dochází ke stoupání křivky trendu. Po ozáření dávkami 50 mSv a 100 mSv už je velmi výrazný vzestup této křivky. Lze říci, že rozdíl mezi měřeními obou typů dozimetřů se zvětšuje se zvyšující se referenční dávkou.

Vezmeme-li si samotné průměry naměřených dávek vidíme, že odchylka od referenční dávky je výrazná u dozimetřů DMC 2000XB, u kterých průměrná naměřená hodnota pro 50 mSv a 100 mSv byla 59,46 mSv a 136,33 mSv po ozáření zpředu ve volném prostoru. U typu EPD1 v těchto vysokých dávkách byly průměry odezev 47,24 mSv a 95,94 mSv.

Po ozáření dozimetřů umístěných na fantomu byly opět odezvy od DMC 2000XB v těchto dávkách vyšší než od EPD1. U referenční dávky 50 mSv DMC 2000XB naměřily průměrnou hodnotu 66,87 mSv a EPD1 52,21 mSv. Pro hodnotu referenční dávky 100 mSv byl rozdíl mezi DMC 2000XB a EPD1 51,63 mSv. Dozimetř typu DMC 2000XB vykazoval průměrnou odezvu 160,35 mSv a typ EPD1 108,72 mSv.

Pro doplnění a lepší posouzení jsou v přílohách v kapitole 9. umístěny tabulky s vypočtenou dávkovou závislostí a grafy s vynesenu regresní přímkou závislosti

„naměřené odezvy“ na „referenční dávce“. Dávková závislost ve zvolené měřené oblasti je u dozimetru typu EPD1 lineární a u DMC 2000XB se regresní přímka více zvedá. Tyto výpočty opět potvrzují, že lze zamítnout nulovou hypotézu, která říká, že dozimetry měří stejně.

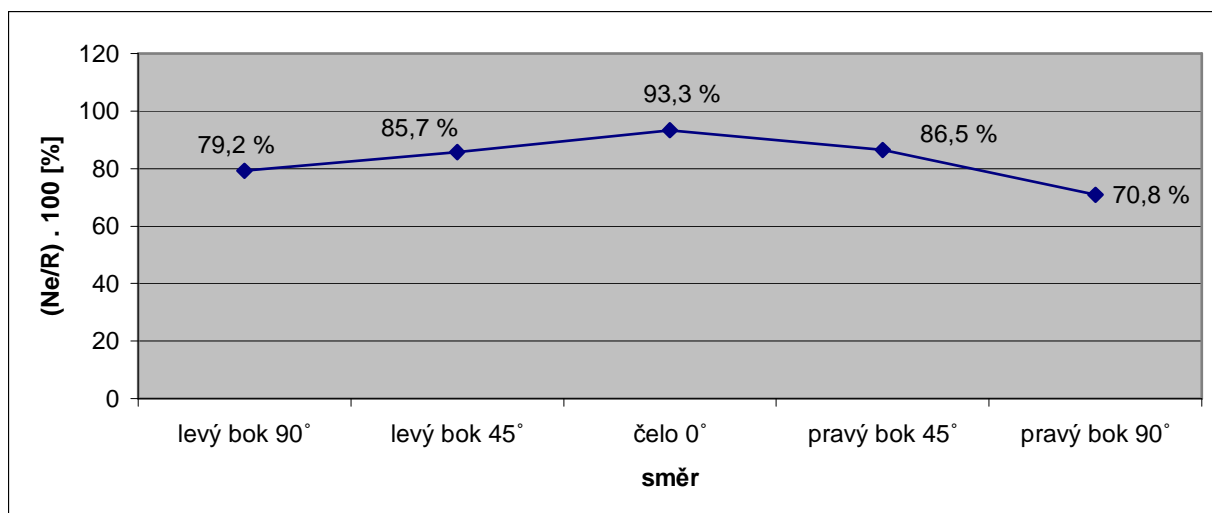
5.2 Směrová závislost

V následujících tabulkách a grafech jsou uvedeny směry, ve kterých se ozáření provádělo a podíl průměrné naměřené dávky ku referenční dávce vyjádřený v procentech. Směry ozařování byly zleva pod úhly $\alpha = 90^\circ$ a $\alpha = 45^\circ$, zpredu $\alpha = 0^\circ$, zprava pod úhly $\alpha = 90^\circ$ a $\alpha = 45^\circ$ a nakonec i zadní část dozimetru $\alpha = 180^\circ$.

Tab. 5.2.1: Směrová závislost dozimetrů po ozáření ve volném prostoru.

směr	$(N_E/R).100$ (průměr)	$(N_D/R).100$ (průměr)
levý bok 90°	79,2	77,2
levý bok 45°	85,7	97,5
čelo 0°	93,3	100,5
pravý bok 45°	86,5	97,5
pravý bok 90°	70,8	92,2
zezadu 180°	72,1	89,1

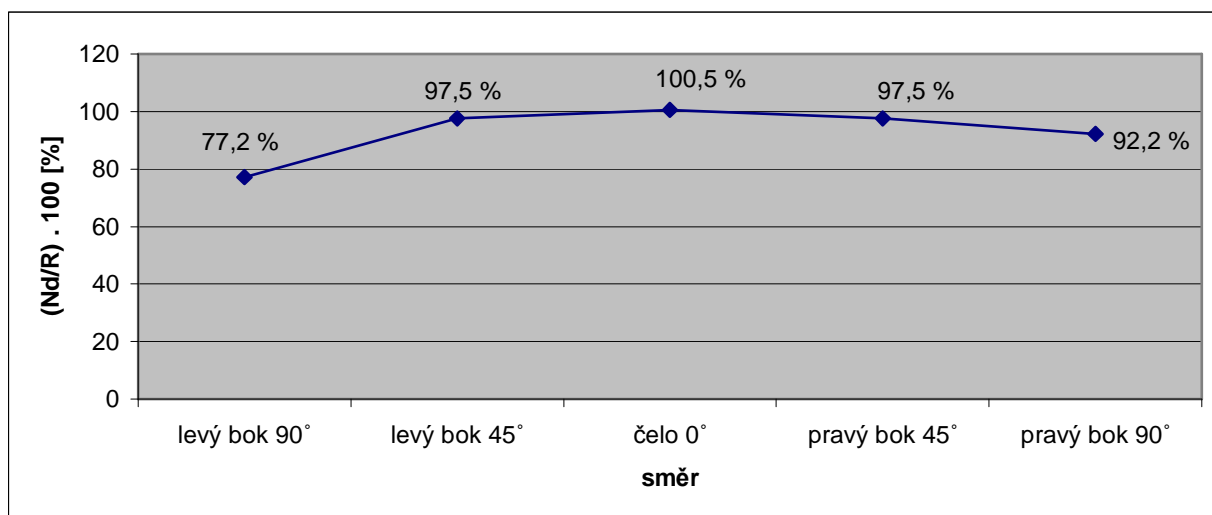
EPD1 po ozáření ve volném prostoru



Graf 5.2.1 Směrová závislost dozimetru EPD1 po ozáření ve volném prostoru.

Z uvedené tabulky a grafu je zřejmé, že pokud se hodnotí vliv směru na ozáření, jsou hodnoty podílu průměrného naměřeného dávkového ekvivalentu $H_p(10)$ a referenční dávky vyjádřené v procentech nejvyšší pro úhel $\alpha = 0^\circ$, a to 93,3 %. Při ozařování pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ byly naměřené hodnoty nižší, ale pro oba boky velmi podobné (85,69 % pro levý bok, 86,45 pro pravý bok). Nejnižší hodnoty, o 12,5 % menší ve srovnání s odezvou u čelního ozáření, jsou pro boční ozařování zprava pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ (70,8%).

DMC 2000XB po ozáření ve volném prostoru



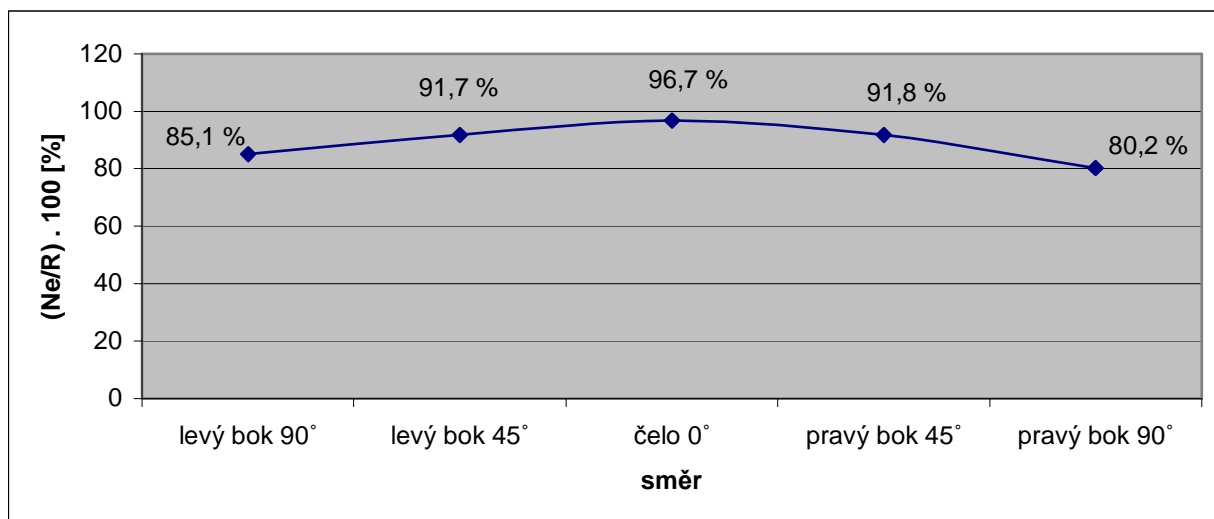
Graf 5.2.2 Směrová závislost DMC 2000XB po ozáření ve volném prostoru.

V tabulce č. 5.2.1 je vyjádřena směrová závislost dozimetru DMC 2000XB. Z tabulky i grafu č. 5.2.2 je patrné, že nejvyšších hodnot 100,5 % je dosaženo po ozáření dozimetru zepředu pod úhlem $\alpha = 0^\circ$. Pro úhel $\alpha = 45^\circ$ z levého i pravého boku jsou hodnoty totožné 97,5 %. Výsledek po ozáření z pravého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ byl nižší 92,15 %. U tohoto grafu je na první pohled viditelné, že spojnice bodů klesá u bodu pro získané hodnoty ozáření z levého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ (77,2 %). U dozimetru DMC 2000XB firmy MGP Instruments se detektor nenachází přesně ve středu dozimetru, ale blíže k pravému boku, proto hodnoty při ozáření levého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ jsou podstatně menší než předešlé. Rozdíl mezi ozářeními zepředu a tohoto směru je 23,3 %.

Tab. 5.2.2: Směrová závislost dozimetru po ozáření umístěných na fantomu.

směr	$(N_E/R).100$ (průměr)	$(N_D/R).100$ (průměr)
levý bok 90°	85,1	82
levý bok 45°	91,7	102,9
čelo 0°	96,7	106,8
pravý bok 45°	91,8	104,3
pravý bok 90°	80,2	97,5
zezadu 180°	81,7	99,7

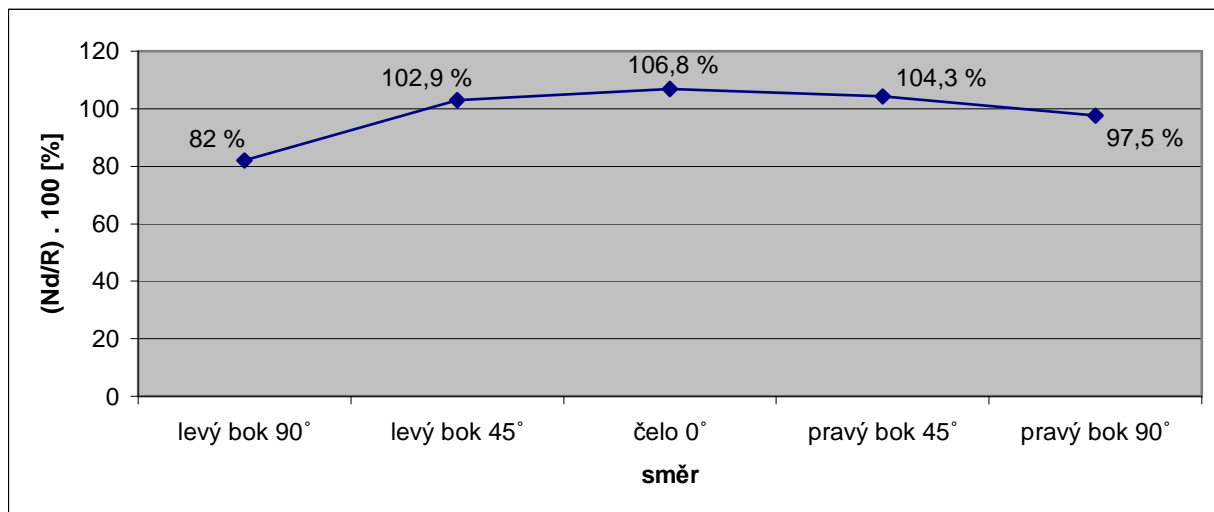
EPD1 po ozáření na fantomu



Graf 5.2.3 Směrová závislost dozimetru EPD1 ozařovaného na fantomu.

Výsledky jsou vloženy v tabulce č. 5.2.2. Oproti naměřeným hodnotám při ozařování bez fantomu jsou vyšší. Spojnice grafu má obdobný tvar. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo při ozáření z předu, kde podíl naměřené odezvy a referenční dávky byl 96,7 %. Pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ byly hodnoty téměř shodné, 91,7 pro levý bok a 91,8 pro pravý. Nižší odezvy jsou zřejmé u obou boků ozařovaných pod úhlem $\alpha = 90^\circ$. Nejnižší podíl byl zjištěn opět u pravého boku, a to 80,2 %.

DMC 2000XB po ozáření na fantomu



Graf 5.2.4 Směrová závislost dozimetru DMC 2000XB ozařovaného na fantomu.

Dozimetry umístěné na fantomu vykazovaly zhruba o 5 – 6 % větší naměřené hodnoty než předešlé bez fantomu. Opět je nejvyšší hodnota 106,8 % naměřena po ozáření referenční dávkou zpredu. Hodnoty pro levý a pravý bok pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ jsou o trochu nižší, ale velmi podobné, a to pro levý bok 102,9 % a pro pravý 104,3 %. Pro dozimetr umístěný na fantomu pod úhlem $\alpha = 90^\circ$ z pravého boku je hodnota podílu naměřeného dávkového ekvivalentu $H_p(10)$ a referenční dávky 97,5 %. Nejnižší hodnota 82 %, jež je o 14,8 % menší oproti hodnotě po ozáření zpredu, byla zjištěna u levého boku pod úhlem $\alpha = 90^\circ$.

5.3 Energetická závislost

5.3.1 Energetická závislost dozimetru typu EPD1

K zjištění energetické závislosti bylo ozářeno 5 kusů dozimetrů typu EPD1. Při měření jeden dozimetr udával chybné hodnoty, a proto byl z výsledků vyloučen.

Dozimetry vykazují energetickou závislost uvedenou v kapitole 4. v tabulce č. 4.2.1.1 (naměřené odezvy po ozáření zářičem ^{137}Cs a ^{60}Co) a č. 4.2.1.3 (naměřené odezvy po ozáření rentgenem). Pro lepší porovnání získaných hodnot je zde vypočtena průměrná dávka, směrodatná odchylka, relativní směrodatná odchylka a procentuální odchylka od referenční dávky.

Co se týče energetické závislosti dozimetru EPD1 po ozáření rentgenem dosahují nejvyšší hodnoty odezev pro energii 16 keV, kdy průměrná odezva po ozáření referenční dávkou 1 mSv byla 1,490 mSv. Jak je patrné z grafu uvedeného v podkapitole 4.2.1, kde je vynesena energetická závislost, hodnoty se pak snižují a pouze u energie 65 keV se objevuje malý pík. Hodnota naměřeného dávkového ekvivalentu $H_p(10)$ 1,141 mSv není ale příliš výrazná. Po ozáření dozimetru vysokými energiemi 662 keV (^{137}Cs) a 1250 keV (^{60}Co) byly odezvy 0,875 mSv a 0,995 mSv.

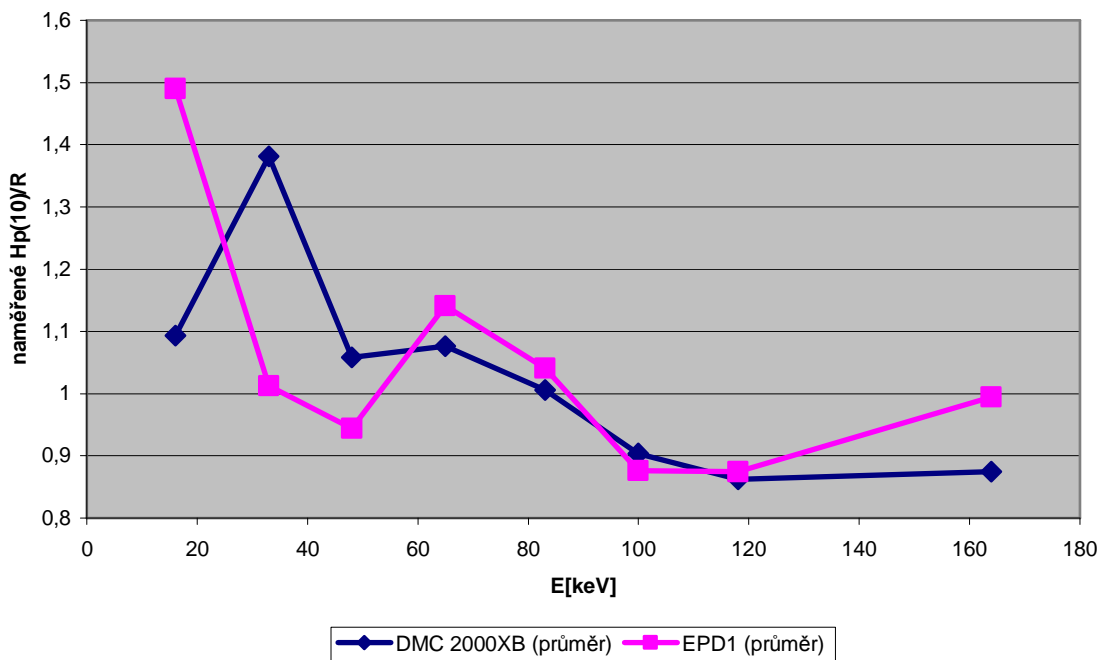
5.3.2 Energetická závislost dozimetru typu DMC 2000XB

Energetická závislost je uvedena v tabulkách č. 4.2.2.1 (naměřené odezvy po ozáření zářičem ^{137}Cs a ^{60}Co) a č. 4.2.2.3 (naměřené odezvy po ozáření rentgenem) a posléze vynesena do grafů. Ozářeno bylo celkem 5 kusů dozimetrů.

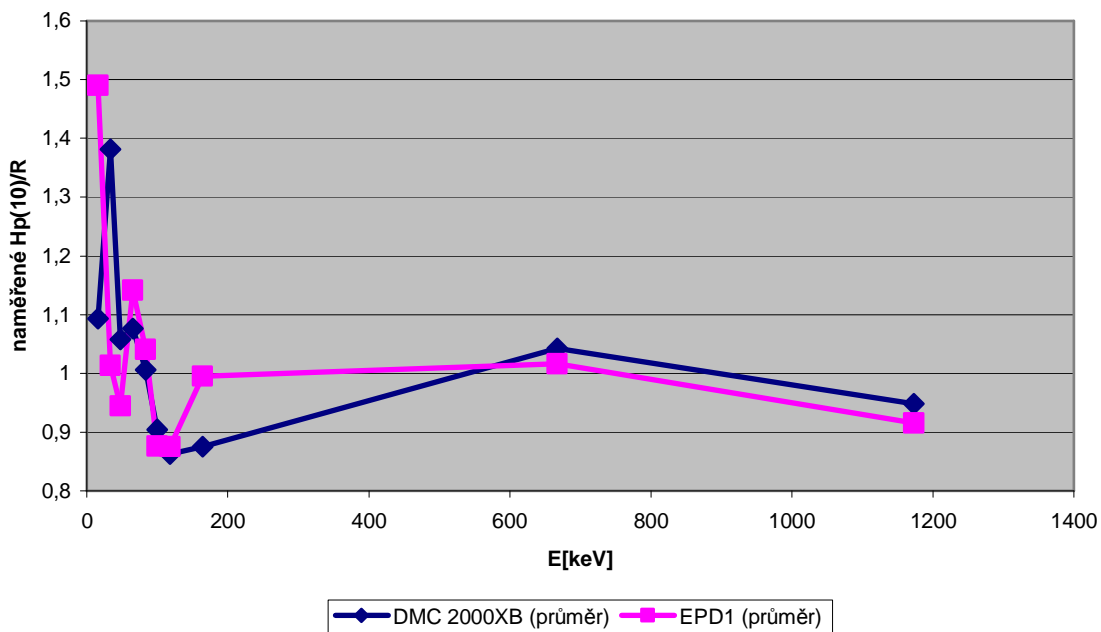
Nejvyšší hodnoty odezev vykazují dozimetry DMC 2000XB po ozáření energií 33 keV, kdy je na grafu jasně viditelný pík a naměřený dávkový ekvivalent $H_p(10)$ byl v průměru 1,381 mSv. Pro ostatní energie, tedy 16 keV, 48 keV, 65 keV a 83 keV je energetická závislost malá. U posledních tří energií lze na grafu pozorovat o trochu nižší odezvy. Pro vysoké energie 662 keV (^{137}Cs) a 1250 keV (^{60}Co) byly průměrné naměřené hodnoty dávkového ekvivalentu $H_p(10)$ 1,0424 mSv a 0,9476 mSv.

5.3.3 Porovnání energetických závislostí dozimetrů EPD1 a DMC 2000XB

Porovnání EPD1 a DMC 2000XB



Porovnání EPD1 a DMC 2000XB
(v grafu i Cs-137 a Co-60)



V grafech jsou vyneseny energetické závislosti obou typů dozimetřů. První graf obsahuje pouze výsledky měření po ozáření rentgenem a v druhém včetně ozáření zářičem ^{137}Cs a ^{60}Co . Nejvyšší naměřenou odezvu 1,49 mSv vykazuje EPD1 při ozáření energií 16 keV. Dozimetr DMC 2000XB zde změřil dávkový ekvivalent $H_p(10)$ 1,093 mSv. U energie 33 keV již naměřená hodnota EPD1 klesla na 1,013 mSv a u DMC 2000XB je v grafu vidět výrazný vzestup a průměrná odezva je 1,381 mSv. U dalších energií je patrnější pokles u obou typů a u energií 65 keV, 83 keV, 100 keV a 118 keV křivky mají velmi podobný průběh i hodnoty. Při ozáření 164 keV je v grafu patrný vzestup u dozimetru typu EPD1, naměřená odezva je 0,995 mSv a u DMC 2000XB jen 0,875 mSv. U vysokých energií 662 keV (^{137}Cs) a 1250 keV (^{60}Co) je průběh grafu téměř vyrovnaný u obou dozimetřů, získané hodnoty u typu EPD1 jsou 1,016 mSv a 0,915 mSv a u typu DMC 2000XB 1,042 mSv a 0,947 mSv, u těchto hodnot je energetická závislost malá.

6. Závěr

V této diplomové práci bylo mým záměrem přiblížit problematiku operativního monitorování.

Elektronické osobní dozimetry se na Jaderné elektrárně Temelín a Jaderné elektrárně Dukovany pro tyto účely stále využívají. Jejich nespornou výhodou je, že splňují funkci přímoodečítacího signálního dozimetru a Systém elektronické osobní dozimetrie (SEOD) poskytuje aktuální informace o dávkách, počtu pracovníků v kontrolovaném pásmu a počtu odpracovaných hodin na konkrétních zařízeních. Následné analýzy získaných údajů vedou k lepšímu plánování kolektivní efektivní dávky.

Provedla jsem porovnání dvou typů elektronických osobních dozimetrů. Dozimetry EPD1 firmy Siemens (Velká Británie) a DMC 2000XB firmy MGP Instruments (Francie) jsem hodnotila z hlediska jejich dávkové, směrové a energetické závislosti.

Z uvedených výsledků a statistického zhodnocení vyplývá, že rozdíl v měření obou typů existuje a mohu tedy zamítnout svou hypotézu o jejich shodnosti. Především u dávkové závislosti je rozdíl dozimetrů znatelný. Po ozáření nižšími hodnotami osobního dávkového ekvivalentu se jevíly odezvy jako velmi podobné, ale při ozáření referenčními dávkami 50 mSv a 100 mSv byly odchylky měření u dozimetru DMC 2000XB výrazné, naopak měření dozimetrů EPD1 mělo lineární průběh.

Pro směrovou závislost byla u obou typů shoda v tom smyslu, že dosahovaly nejpřesnějších výsledků měření po ozáření zřepředu pod úhlem $\alpha = 0^\circ$. Lišily se však po ozáření pod úhlem $\alpha = 90^\circ$. Největší chyba při různých směrech ozařování byla pro typ DMC 2000XB po ozáření z levého boku, protože detektor není umístěn ve středu dozimetru, ale blíže k pravému boku.

Při hodnocení energetické závislosti rozdíly měření nebyly příliš velké, oba typy však vykazovaly maxima po ozáření odlišnými energiemi, u EPD1 po ozáření 16 keV a u DMC 2000XB 33 keV.

Myslím, že nelze jednoznačně určit, který z těchto dvou dozimetrů je pro použití osobního monitorování lepší.

7. Seznam použité literatury

Monografie

- (1) GERNDT, J. *Detektory ionizujícího záření*. Praha : ČVUT, 1994. 164 s. ISBN 80-01-01229-8.
- (2) HÁLA, J. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. Brno : Konvoj, 1998. 311 s. ISBN 80-85615-56-8.
- (3) HUŠÁK, V. *Dozimetrie a ochrana před zářením v nukleární medicíně*. Brno : Institut pro další vzdělávání středních zdravotnických pracovníků, 1987. 142 s.
- (4) KLENER, V. et al. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha : Azin, 2000. ISBN 80-238-3703-6.
- (5) KLIMEŠ, L. *Slovník cizích slov*. 6. přeprac. vyd. Praha : SPN-pedagogické nakladatelství, 2002. ISBN 80-7235-023-4.
- (6) KOLÁČEK, P., BROUNKOVÁ, D. *Příručka pro vstup do kontrolovaného pásma ČEZ-EZE*. Brno, 2004.
- (7) KUNA, P., NAVRÁTIL, L. et al. *Klinická radiobiologie*. Manus, 2005. 222 s. ISBN 80-86571-09-2.
- (8) MUSÍLEK, L., ŠEDA, J., TROUSIL, J. *Dozimetrie ionizujícího záření*. Praha : ČVUT, 1992. 282 s. ISBN 80-01-00812-6.
- (9) PETR, I. *Dozimetrie ionizujícího záření II*. Praha : ČVUT, 1986. 194 s.
- (10) SABOL, J. *Základy dozimetrie*. Praha : ČVUT, 1992. 148 s. ISBN 80-01-00847-9.
- (11) SINGER, J. *Dozimetrie ionizujícího záření*. České Budějovice : Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2005. 67 s. ISBN 80-7040-752-2.
- (12) SINGER, J., HEŘMANSKÁ, J. *Principy radiační ochrany*. České Budějovice : Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta, 2004. 111s. ISBN 80-7040-708-5.
- (13) 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.
- (14) ŠEDA, J. et al. *Dozimetrie ionizujícího záření*. Praha: SNTL, 1983.

- (15) VAŇKOVÁ, M. et al. *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí*. Brno : VUT, 1996. ISBN 80-214-0818-9.
- (16) ZVÁROVÁ, J. *Základy statistiky pro biomedicínské obory*. Praha : Karolinum, 1999. 220 s. ISBN 80-7184-786-0.

Časopisecké statě

- (17) FIALA, L., KULICH, V. Program monitorování radiační situace v JE Dukovany. *Bezpečnost jaderné energie*. 2004, č. 7/8, s. 216-217. ISSN 1210-7085.
- (18) HAVRÁNKOVÁ, R., KOC, J. et al. Možnosti elektronické osobní dozimetrie na Jaderné elektrárně Temelín. *Kontakt*. 2005, č. 3/4, s. 356-359. ISSN 1212-4117.
- (19) JUROCHOVÁ, B., ZELENKA, Z. Zkušenosti z provozu elektronické osobní dozimetrie v kontrolovaném pásmu Jaderné elektrárny Dukovany. *Bezpečnost jaderné energie*. 2004, č. 7/8, s. 234-236. ISSN 1210-7085.
- (20) TROUSIL, J., ZÍDEK, V., PLICHTA, J. Termoluminiscenční dozimetrie v celostátní službě CSOD. *Bezpečnost jaderné energie*. 2004, č. 3/4, s. 119-122. ISSN 1210-7085.

Nepublikované texty

- (21) DOBEŠ, P. *Detekce a dozimetrie ionizujícího záření*. České Budějovice, 2005. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Zdravotně sociální fakulta. Vedoucí práce doc. MUDr. Jozef Rosina.
- (22) FÁRNÍKOVÁ, M., KOC, J. *Zavedení systému legální elektronické osobní dozimetrie na jaderných elektrárnách v ČR*. XXIX. Dny radiační ochrany, Kouty nad Desnou, 2007.
- (23) *Instruction Manual Automatic RPL-Glass Dosimetry System FGD-203*. Asahi Techno Glas Corporation, 1999.
- (24) *Metodika: Předpis pro kontrolu kalibrace elektronického osobního dozimetru Siemens EPD1E*. ČEZ-ETE, 1999.
- (25) POSPÍCHAL, J. *Pracovní postup: Měření zevního ozáření*. ČEZ-ETE, 2002.

- (26) *Technická příručka: Elektronický osobní dozimetr EPD. 1998.*
- (27) *User's guide DMC 2000S/X/XB.* MGP Instruments.

Elektronický zdroj

- (28) *MGP DMC-2000S/X/XB - Elektronické osobní dozimetry.* [online], [cit. 2008-2-4]. Dostupné na: <<http://www.rdsys.cz/index.php?id=14>>.
- (29) *Polovodičová dioda.* [online], [cit. 2008-2-4]. Dostupné na: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Polovodi%C4%8Dov%C3%A1_dioda>.
- (30) *Systém elektronické osobní dozimetrie SEOD.* [online], [cit. 2007-10-21]. Dostupné na: <<http://www.vf.cz/produkty/radiacni-kontrola-a-ochrana/dozimetrie/seod.html>>.
- (31) *Termoluminescent doseimeters.* [online], [cit. 2005-12-14]. Dostupné na: <<http://dawki.ifj.edu.pl/en/metpom/main.html>>.

Legislativa

- (32) Vyhláška č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně v platném znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.
- (33) Zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (Atomový zákon) v platném znění zákona č. 13/2002 Sb.

8. Klíčová slova

operativní monitorování

termoluminiscenční dozimetrie

elektronická dozimetrie

radiofotoluminiscenční dozimetrie

dávková závislost

směrová závislost

energetická závislost

9. Přílohy

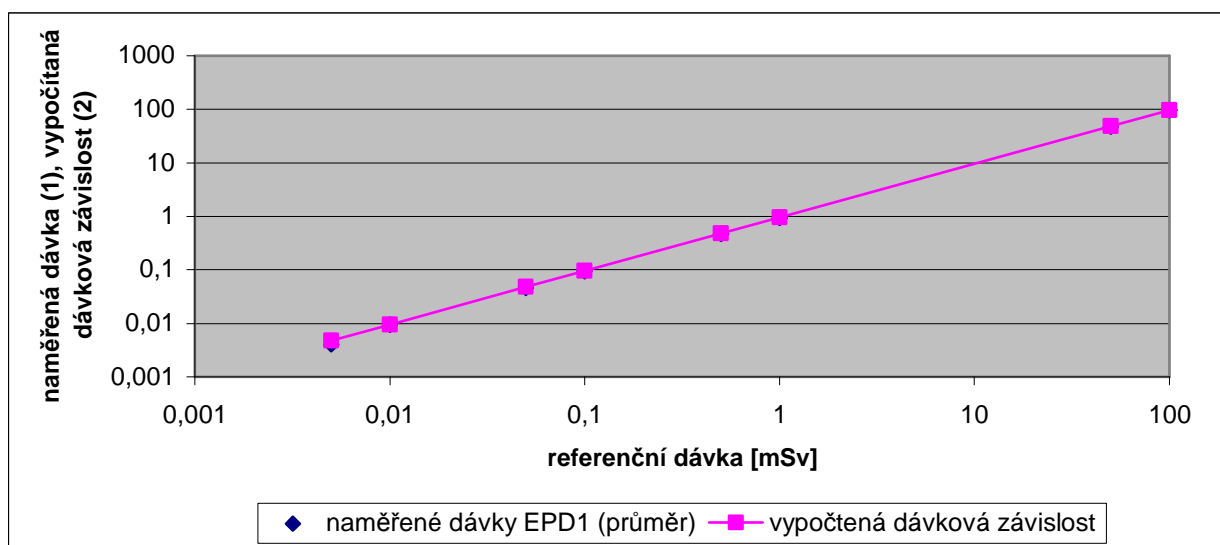
Dávková závislost dozimetru EPD1 ozařovaného ve volném prostoru

Tab. 9.1: Vypočtená dávková závislost dozimetru EPD1 ve volném prostoru.

referenční dávka (R) [mSv]	N _E (průměr) [mSv]	vypočtená dávková závislost (N _E ⁰)
0,005	0,004	0,005
0,01	0,009	0,010
0,05	0,046	0,048
0,1	0,093	0,096
0,5	0,470	0,479
1	0,943	0,957
50	47,241	47,850
100	95,939	95,700

$$N_E^0 = 0,957 \cdot R - 0$$

N_E - naměřená hodnota EPD1



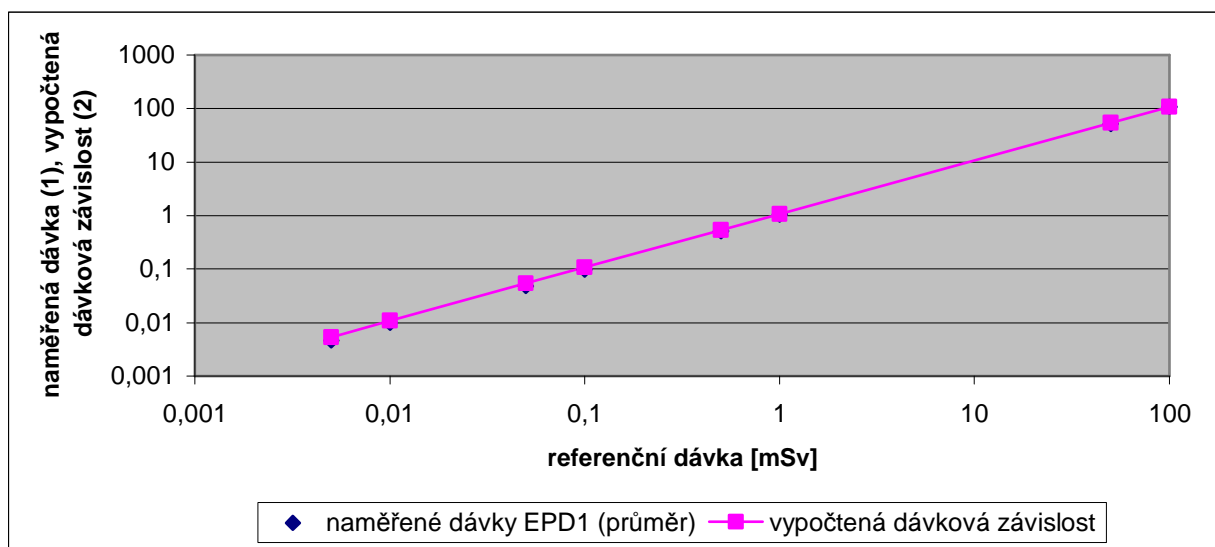
Graf 9.1: Regresní přímka závislosti "naměřené odezvy" na "referenční dávce" u dozimetru EPD1 ozařovaného ve volném prostoru.

Dávková závislost dozimetru EPD1 ozařovaného na fantomu

Tab. 9.2: Vypočtená dávková závislost dozimetru EPD1 umístěném na fantomu.

referenční dávka (R) [mSv]	N _E (průměr) [mSv]	vypočtená dávková Závislost (N _E ⁰)
0,005	0,005	0,005
0,01	0,010	0,011
0,05	0,048	0,054
0,1	0,098	0,108
0,5	0,511	0,540
1	1,041	1,080
50	52,212	54,000
100	108,720	108,000
		$N_E^0 = 1,080 \cdot R - 0$

N_E - naměřená hodnota EPD1



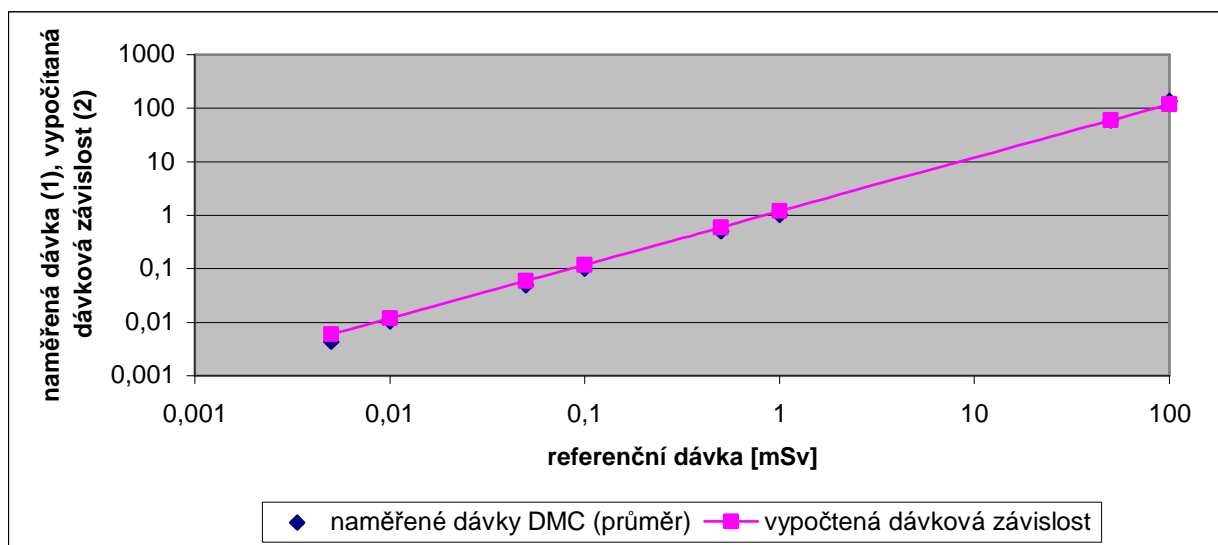
Graf 9.2: Regresní přímka závislosti "naměřené odezvy" na "referenční dávce" u dozimetru EPD1 ozařovaného na fantomu.

Dávková závislost dozimetru DMC 2000XB ozařovaného ve volném prostoru

Tab. 9.3: Vypočtená dávková závislost dozimetru DMC 2000XB ve volném prostoru.

referenční dávka (R) [mSv]	N _D (průměr) [mSv]	vypočtená dávková závislost (N _D ⁰)
0,005	0,004	0,006
0,01	0,010	0,012
0,05	0,049	0,059
0,1	0,100	0,119
0,5	0,504	0,595
1	1,017	1,190
50	59,458	59,500
100	136,333	119,000
		$N_D^0 = 1,190 \cdot R - 0$

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



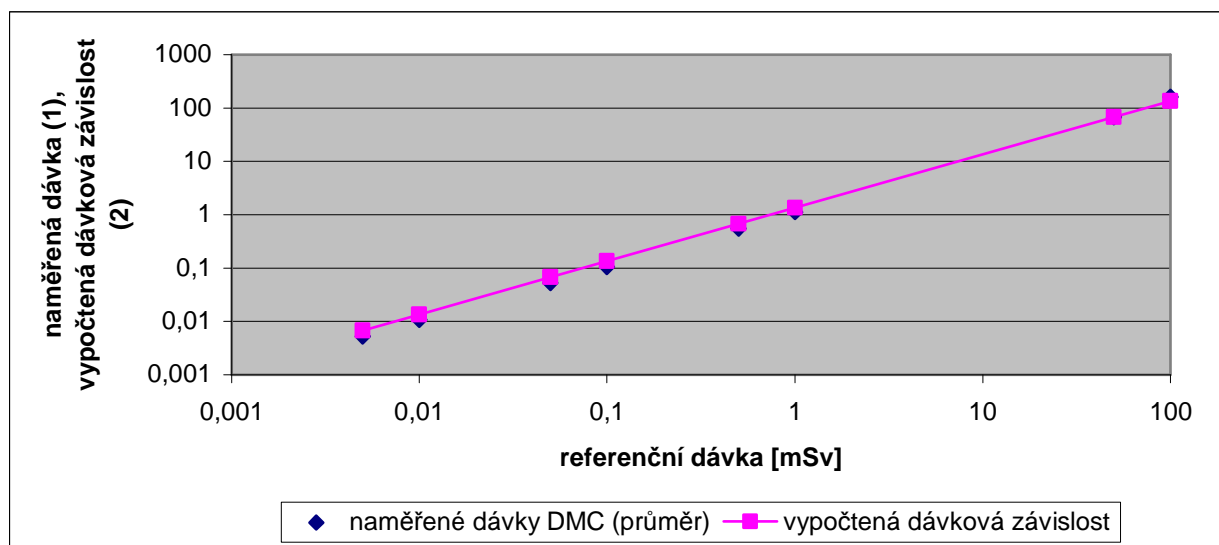
Graf 9.3: Regresní přímka závislosti "naměřené odezvy" na "referenční dávce" u dozimetru DMC 2000XB ozařovaného ve volném prostoru.

Dávková závislost dozimetru DMC 2000XB ozařovaného na fantomu

Tab. 9.4: Vypočtená dávková závislost dozimetru DMC 2000XB umístěném na fantomu.

referenční dávka (R) [mSv]	N _D (průměr) [mSv]	vypočtená dávková závislost (N _D ⁰)
0,005	0,005	0,007
0,01	0,011	0,013
0,05	0,052	0,066
0,1	0,106	0,133
0,5	0,545	0,669
1	1,116	1,339
50	66,874	66,950
100	160,350	133,900
		$N_D^0 = 1,339 \cdot R - 0$

N_D - naměřená hodnota DMC 2000XB



Graf 9.4: Regresní přímka závislosti "naměřené odezvy" na "referenční dávce" u dozimetru DMC 2000XB ozařovaného na fantomu.