



Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.
Oddělení dozimetrie
Bartoškova 28, 140 00 Praha 4

Metodika M5

Certifikovaná metodika

**Stanovení dávky pomocí TLD v rámci
korespondenčního auditu v radioterapii**

Vypracoval

Funkce	Jméno	Datum	Podpis
Vedoucí oddělení dozimetrie	Ing. Daniela Ekendahl	7.4.2014	

Přezkoumal a schválil

Funkce	Jméno	Datum	Podpis
Ředitel SÚRO	RNDr. Zdeněk Rozlívka	15.4.2014	
Archivní označení	SÚRO 141-17.8-0	Číslo revize	0
Výtisk číslo	1	Datum účinnosti	1.1.2015

Rozdělovník

Výtisk	Převzal	Datum	Podpis
č. 1	Síťový disk T:\TLD audit\Metodiky\Metodika M5.pdf Ing. Daniela Ekendahl		
č. 2			
č. 3			

Oponenti

Jméno	Organizace	Datum	Podpis

Vypracováno v rámci projektu TB01SUJB071 Rok uplatnění 2014
podporovaného TA ČR

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 3 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

OBSAH

1. CÍL METODIKY	4
2. POJMY, ZKRATKY, SYMBOLY	4
2.1. ZÁKLADNÍ POJMY	4
2.2. VÝZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	4
3. POPIS MĚŘÍČÍHO SYTÉMU A KALIBRACE	5
3.1. MĚŘENÍ A ZÁZNAM DAT	5
3.2. DOZIMETRY	6
3.3. KALIBRACE	6
4. STANOVENÍ DÁVKY	7
4.1. VZTAH MEZI DÁVKOU A ODEZVOU TLD	7
4.2. KOREKČNÍ KOEFICIENTY	7
4.3. NEJISTOTA MĚŘENÍ	9
5. EXPERIMENTÁLNÍ PŘÍLOHA	10
5.1. PARAMETRY MĚŘENÍ TLD	10
5.2. EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÉ HODNOTY K_{EN}	11
5.3. EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÉ HODNOTY K_{LIN}	12
5.4. EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÉ HODNOTY K_{FAD}	13
5.5. EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÉ NEJISTOTY MĚŘENÍ	14
6. PRAKTICKÉ POSTUPY	15
6.1. ANNEALING A SELEKCE TL PRÁŠKU	15
6.2. PŘÍPRAVA DOZIMETRŮ	16
6.3. DOZIMETRICKÁ SESTAVA PRO TLD AUDIT	17
6.4. PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MĚŘENÍ	18
6.5. POSTUP PŘI MĚŘENÍ	20
6.6. VYHODNOCENÍ DÁVKY	21
6.7. EVIDENCE A DOKUMENTACE DAT	21
6.8. PŘEDÁVÁNÍ DAT	22
7. ZABEZPEČENÍ JAKOSTI	22
7.1. METROLOGICKÉ ZABEZPEČENÍ	22
7.2. SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ	22
7.3. ZKOUŠKY PROVOZNÍ STÁLOSTI	22
8. UPLATNĚNÍ METODIKY A NOVOST POSTUPŮ	23
9. SEZNAM LITERATURY	24

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 4 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

1. CÍL METODIKY

Cílem této metodiky je specifikace laboratorních procedur a postupů potřebných ke stanovení absorbované dávky metodou termoluminisceční dozimetrie (TLD) v rámci nezávislého korespondenčního auditu v radioterapii [1].

2. POJMY, ZKRATKY, SYMBOLY

2.1. ZÁKLADNÍ POJMY

Dávka

Absorbovaná dávka D je definována jako podíl střední sdělené energie $d\bar{\epsilon}$, předané ionizujícím zářením látce v objemovém elementu, a hmotnosti této látky dm v uvažovaném elementu:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

V rámci TLD auditu v radioterapii se stanovuje dávka absorbovaná ve vodě. Jednotkou dávky je Gy, který má význam $J \cdot kg^{-1}$.

Termoluminiscenční dozimetrie (TLD)

Metoda spočívající v dozimetrickém využití jevu termoluminiscence, tj. termálně stimulované emise světla z krystalického materiálu, který byl vystaven ionizujícímu záření. Dávka je pak stanovena na základě měření množství uvolněného světla.

Korespondenční audit v radioterapii (TLD audit)

Pravidelná nezávislá kontrola dávky spočívající ve stanovení dávky pomocí TLD ozářených radioterapeutickým pracovištěm předepsaným způsobem a porovnání této dávky s dávkou udanou radioterapeutickým pracovištěm [1]. Cílem je nezávislá kontrola dávek aplikovaných radioterapeutickým pracovištěm.

2.2. VÝZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

TPR _{20/10}	Poměr hodnot izocentrické hloubkové dávky v hloubkách 20 a 10 g/cm ² pro svazek velikosti 10 × 10 cm ² a vzdálenost ionizační komory od zdroje 100 cm. Používá se jako ukazatel kvality vysokoenergetických fotonových svazků.
SAD	Vzdálenost osy rotace ramene od zdroje, <i>Source Axis Distance</i>

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 5 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

SSD	Vzdálenost povrchu fantomu od zdroje, <i>Source Surface Distance</i>
Z _{ref}	Referenční hloubka v g/cm ² pro měření ve fantomu
Z _{max}	Hloubka, ve které nabývá dávka svého maxima

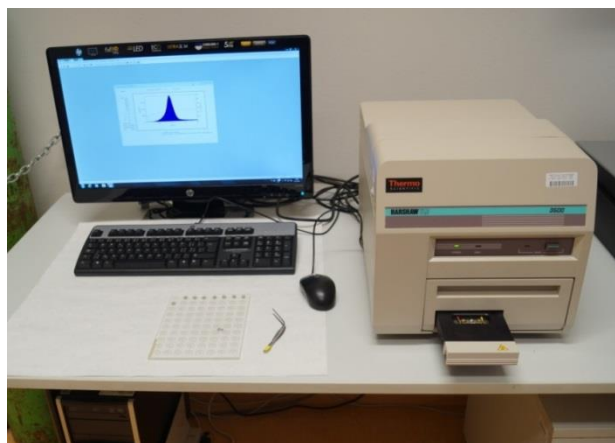
3. POPIS MĚŘÍČÍHO SYTÉMU A KALIBRACE

Měřicí systém pro účely korespondenčního auditu v radioterapii zahrnuje následující přístroje, dozimetry a příslušenství:

- čtečku TLD Harshaw 3500
- osobní počítač se SW aplikací WinRems pro řízení měření a záznam naměřených dat
- TL dozimetry na bázi materiálu LiF:Mg,Ti ve formě prášku o velikosti zrn 75 – 200 μm
- dispensory
- mističky pro přípravu vzorků

3.1. MĚŘENÍ A ZÁZNAM DAT

Měření a záznam dat se provádí **čtečkou Harshaw 3500** řízenou prostřednictvím **SW aplikace WinRems** (viz obr. 1), která je nainstalována na připojeném počítači. Základní funkcí čtečky je vyvolat a změřit TLD signál. Měřený vzorek (detektor) je tedy řízeně vyhříván a uvolněné luminiscenční světlo je kvantitativně zachycováno fotonásobičem. Parametry termální stimulace jsou uvedeny v části 5.1. Při měření jsou zaznamenávány termoluminiscenční křivky. Výstupní signál z jednotlivého měření je stanoven jako integrál příslušné TL křivky. Velikost tohoto signálu je úměrná dávce.



Obr. 1: Čtečka Harshaw 3500 připojená k počítači se SW aplikací WinRems

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 6 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

3.2. DOZIMETRY

TL dozimetr má formu světlotěsné vodotěsné cylindrické kapsle z plastu (délka 20 mm, vnitřní průměr 2.8 mm, tloušťka stěny 1 mm), která je naplněna termoluminiscenčním materiálem **LiF:Mg,Ti** (typ MT-N, výrobce TLD Poland) **v práškové formě**. Kapsle obsahuje přibližně 160 mg prášku, což po rozdělení do mističek poskytuje 9 identických jednotlivých vzorků v rámci jednoho dozimetru. Měření dozimetru probíhá jako postupné měření jednotlivých vzorků, tj. mističek s práškem. Odezva dozimetru je stanovena jako aritmetický průměr odezvy jednotlivých porcí prášku. Variační koeficient pro průměr naměřených odezvy vztažený k jednomu dozimetru ozářenému za referenčních podmínek nepřesahuje hodnotu 0.65%.

Materiál LiF:Mg,Ti vykazuje některé specifické dozimetrické vlastnosti, které musí být zohledněny při interpretaci výsledků měření. Jedná se o následující jevy:

- **supralinearitu** - hodnota TL odezvy přepočtené na jednotku aplikované dávky narůstá s rostoucí hodnotou dávky v oblasti dávek typických pro radioterapii;
- **fading** - pokles odezvy v čase po ozáření;
- **závislost TL odezvy na kvalitě záření**.

Postup pro korekci těchto jevů je popsán v části 4.2.

Jednotlivé procedury laboratorní přípravy materiálu – annealing, rozdělení prášku do kapslí, příprava vzorků pro měření – jsou podrobně popsány v kapitole 6.

3.3. KALIBRACE

TLD je relativní metoda a k převodu naměřené odezvy na dávku je třeba přesná kalibrace TLD systému. Pro odvození kalibračního faktoru K_{cal} je vyčleněna skupina kapslí, tzv. **kalibračních TLD**, které jsou ozářeny zdrojem ^{60}Co na dávku $D_{kal} = 2 \text{ Gy}$ při nastavení **referenčních podmínek**, tj. ve vodním fantomu na centrální ose svazku v hloubce 5 cm, při běžně používané hodnotě SSD, resp. SAD, a velikosti pole $10 \times 10 \text{ cm}^2$. K fixaci dozimetru se používá specifický stojánek pro fotonové svazky vyvinutý IAEA pro potřeby TLD auditu [1]. Alternativní možností je využití víceúčelového polystyrenového fantomu [1], který umožňuje fixaci TLD za popsaných podmínek nastavení. Ozáření provádí autorizované metrologické středisko v době termínu TLD auditu.

Je-li R_{kal} [nC] průměrná odezva skupiny kalibračních dozimetrů ozářených dávkou D_{kal} [Gy], pak kalibrační faktor TLD systému K_{cal} je:

$$K_{kal} = \frac{D_{kal}}{R_{kal}} \left[\frac{\text{Gy}}{\text{nC}} \right]$$

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 7 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Hodnota K_{kal} se stanovuje specificky pro každý TLD audit a měření kalibračních dozimetrů probíhá zároveň s měřením TLD použitých pro audit. Počet kalibračních dozimetrů závisí na počtu kontrolovaných svazků v rámci auditu. Minimální počet pro denní měření je 3 kusy.

4. STANOVENÍ DÁVKY

4.1. VZTAH MEZI DÁVKOU A ODEZVOU TLD

Dávka absorbovaná ve vodě v poloze dozimetru, D [Gy], se z naměřené odezvy dozimetru ozářeného při auditu, R [nC], vypočte podle vztahu:

$$D = R \cdot K_{kal} \cdot K_{en} \cdot K_{lin} \cdot K_{fad}$$

K_{kal} je kalibrační faktor TLD systému. K_{en} , K_{lin} a K_{fad} představují korekční koeficienty pro eliminaci energetické závislosti, supralinearity a fadingu TL materiálu LiF:Mg,Ti. Tyto koeficienty se stanovují zvláště pro každou používanou výrobní šarži materiálu. Aplikace korekčních koeficientů se řídí těmito pravidly:

- Korekci na energetickou závislost aplikujeme vždy, pokud se kvalita měřeného záření liší od kvality svazku ^{60}Co , tedy pro svazky záření X a svazky elektronů. V případě svazků ^{137}Cs není třeba energetickou závislost korigovat, neboť $K_{en}(^{137}\text{Cs}) = 1$.
- Korekce na supralinearitu je nutná tehdy, pokud se naměřená odezva liší o více než $\pm 5\%$ od hodnoty odezvy pro kalibrační dávku 2 Gy.
- Korekce na fading se aplikuje tehdy, pokud časový rozdíl mezi ozářením kalibračních TLD a TLD použitých pro audit přesahuje více než 1 den.

V následující části 4.2. je popsán způsob odvození těchto korekčních koeficientů. Platné hodnoty těchto koeficientů odvozené na základě experimentálních dat jsou uvedeny v kapitole 5.

4.2. KOREKČNÍ KOEFICIENTY

4.2.1. Korekční koeficient energetické závislosti pro svazky záření X a elektronů

Korekční koeficient K_{en} se stanovuje na základě kalibračních dat (R_{kal} , D_{cal} – viz část 3.3.) a odezvy R_Q získaných z měření dozimetrů ozářených svazkem o kvalitě Q za referenčních podmínek, přičemž aplikovaná dávka $D_Q = 2$ Gy. Minimální potřebný počet dozimetrů pro stanovení R_Q je 3 kusy. Ozáření všech dozimetrů potřebných pro stanovení této korekce musí být provedeno ve stejný den. Rovněž jejich měření se provádí ve stejný den. Korekční koeficient K_{en} je pak dán vztahem:

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 8 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

$$K_{en} = \frac{R_{kal}}{R_Q} \cdot \frac{D_Q}{D_{kal}}$$

Ozáření dozimetrů pro měření hodnot R_Q se provádí ve spolupráci s vybraným radioterapeutickým pracovištěm. Hodnota aplikované dávky D_Q se kontroluje nezávislým měřením ionizační komorou v souladu s [2].

Referenční podmínky jsou pro svazky záření X a elektronů stanoveny takto:

- pro **svazky záření X** se jedná o ozáření TLD ve vodním fantomu na centrální ose svazku při nastavení běžné hodnoty SSD nebo SAD a velikosti ozařovacího pole $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Hloubka uložení dozimetru ve vodě závisí na kvalitě záření. V případě $\text{TPR}_{20/10} \leq 0.70$ se nastavuje hloubka 5 cm, pro svazky s $\text{TPR}_{20/10} > 0.70$ se používá hloubka 10 cm. TLD je přitom fixován pomocí stojánku IAEA pro fotonové svazky.
- pro **svazky elektronů** se jedná o ozáření vertikálním svazkem při nastavení běžné hodnoty SSD a velikosti ozařovacího pole $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Hloubka uložení dozimetru se volí jako hloubka z_{\max} , kde dávka nabývá svého maxima nebo jako referenční hloubka z_{ref} pro měření ve fantomu stanovená dle [2]. Příslušnou hloubku lze snadno nastavit pomocí stojánku IAEA pro elektronové svazky. Určitým omezením však je, že tyto stojánky umožňují nastavení hloubky nejvýše 5 cm, což přibližně odpovídá z_{ref} pro energii elektronů 20 MeV.

Hodnoty K_{en} stanovené pro aktuálně používanou šarži TLD materiálu jsou uvedeny v části 5.2.

4.2.2. Korekční koeficient pro eliminaci vlivu supralinearity

Stanovení korekce na supralinearitu vychází z experimentálně stanovené závislosti signálu R na dávce v rozsahu od 1.5 do 2.5 Gy. Skupiny po 3 kapslích ozáříme dávkami D (1.50, 1.75, 2.00, 2.25 a 2.50 Gy) za referenčních podmínek odpovídajících kalibraci (viz část 3.3.). Hodnoty dávky D relativizujeme vzhledem k hodnotě 2 Gy a získáme tak relativní dávky $d(D)$ (0.75, 0.875, 1, 1.125 a 1.25). Naměřené hodnoty odezvy $R(D)$ relativizujeme vzhledem k odezvě $R(D = 2 \text{ Gy})$ a získáme tak hodnoty $r(D)$. Vypočteme hodnoty $d(D)/r(D)$, které následně vyneseme do grafu v závislosti na proměnné r . Tyto hodnoty proložíme lineární funkcí f procházející bodem (1,1). Je-li v rámci TLD auditu naměřena odezva R dozimetru, přepočtená na relativní odezvu r , pak korekční koeficient na supralinearitu stanovíme takto:

$$K_{lin} = f(r)$$

V části 5.3. je uveden příklad odvození této funkce na základě experimentálních reálných dat.

4.2.3. Korekční koeficient pro eliminaci vlivu fadingu

Korekce na fading materiálu LiF:Mg,Ti vyplývá z experimentálně stanovené funkce poklesu odezvy TLD v závislosti na čase. Pro tento účel je třeba ozářit kapsle (minimálně 30 ks) za referenčních podmínek odpovídajících kalibraci (viz část 3.3.). Kapsle jsou poté rozděleny do

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 9 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

skupin po 3 kusech, které jsou postupně měřeny. Měření první skupiny probíhá 1 den po ozáření, poté následují měření třetí a pátý den po ozáření. Další měření probíhají se vzájemným časovým odstupem 7 dní. Výsledky všech měření $R(t)$ v čase t jsou relativizovány vzhledem k výsledku měření provedenému 15 dní po ozáření, tj. $R(15)$. Doba 15 dní totiž odpovídá minimálnímu intervalu mezi ozářeními a měřeními při TLD auditu. Takto získané hodnoty $r(t)$ jsou vyneseny do grafu a je jimi proložena funkce proměnné t . Probíhá-li měření v den, kdy uplynula doba t_{kal} od ozáření kalibračních dozimetrů a doba t_a od ozáření dozimetrů pro audit, pak korekci na fading stanovíme takto:

$$K_{fad} = \frac{r(t_{kal})}{r(t_a)}$$

V části 5.4. je uveden příklad funkce $r(t)$ odvozené na základě platných reálných dat.

4.3. NEJISTOTA MĚŘENÍ

Standardní nejistota odhadu dávky u_D je dána jako odmocnina součtu čtverců nejistot jednotlivých činitelů ze vztahu $D = R \cdot K_{kal} \cdot K_{en} \cdot K_{lin} \cdot K_{fad}$:

$$u_D = \sqrt{u_R^2 + u_{K_{kal}}^2 + u_{K_{en}}^2 + u_{K_{lin}}^2 + u_{K_{fad}}^2}$$

Rozšířená nejistota U_D je pak dána vztahem $U = 2 \cdot u_D$. Takto stanovené rozšířené nejistotě odpovídá pravděpodobnostní pokrytí 95%.

Nejistoty měření experimentálně stanovené pro použitý systém TLD jsou uvedeny v části 5.5.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 10 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

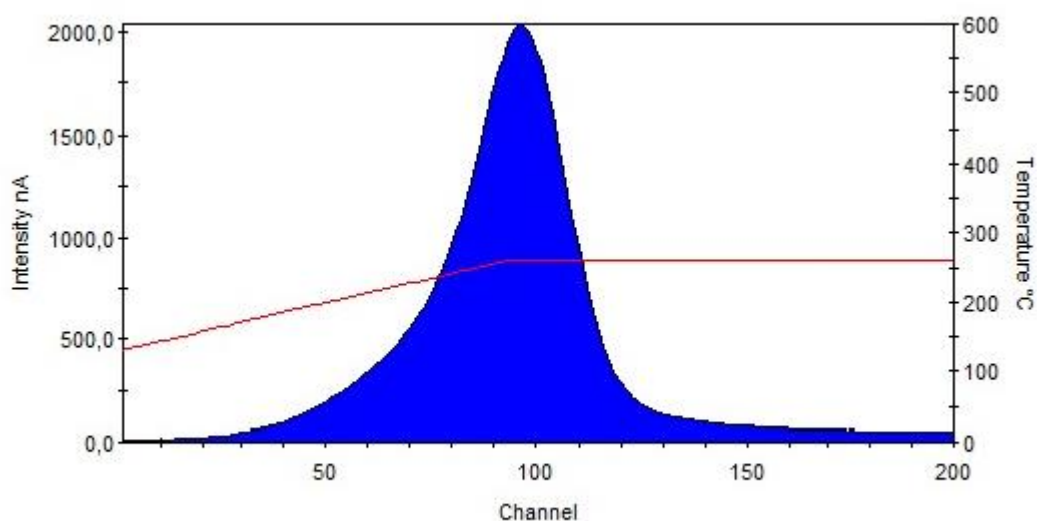
5. EXPERIMENTÁLNÍ PŘÍLOHA

5.1. PARAMETRY MĚŘENÍ TLD

Tab. 1: Aplikované parametry měření pro materiál LiF:Mg,Ti

Přehřev	čas	8 s
	teplota	130°C
Čtení signálu	čas	20 s
	rychlost vyhřívání	14°C/s
	maximální teplota	260°C
Přístrojový annealing	čas	-
	teplota	-

Na obr. 2 je uvedena typická TL křivka získaná při měření vzorku s výše uvedenými parametry měření:



Obr. 2: TL křivka pro výše uvedené parametry měření

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 11 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

5.2. EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÉ HODNOTY K_{en}

V tab. 2a, resp. 2b, jsou uvedeny experimentálně odvozené hodnoty K_{en} platné pro aktuálně používanou šarži TLD materiálu, označenou jako „sada 8“.

Tab. 2a: Hodnoty K_{en} pro záření X

Nominální energie [MV]	K_{en}
4 - 10	1.02
15 - 18	1.03

Tab. 2b: Hodnoty K_{en} pro elektrony

Nominální energie [MeV]	K_{en}
4 - 16	1.05
17 - 23	1.04

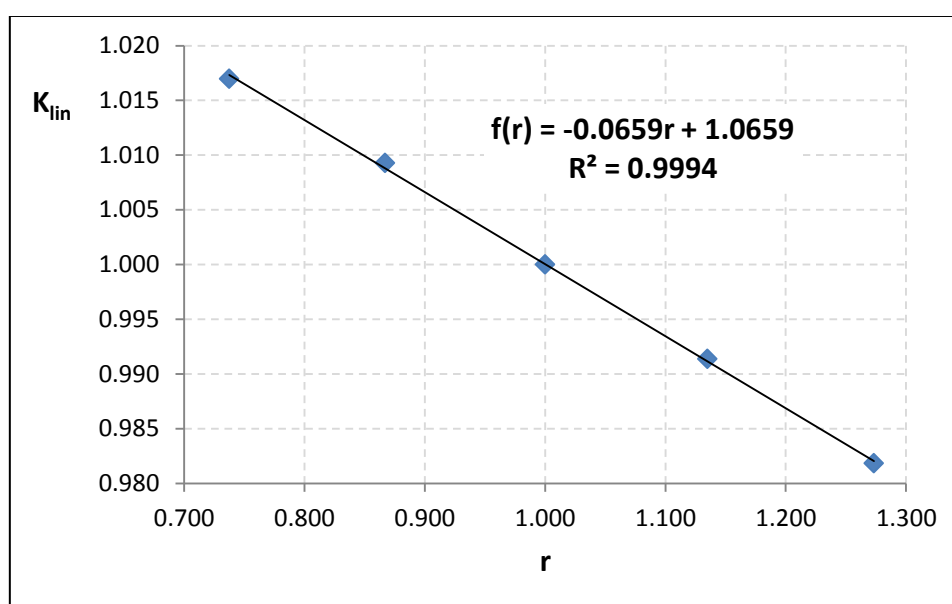
Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 12 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

5.3. EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÉ HODNOTY K_{lin}

V tabulce 3 je uveden příklad typických experimentálních dat pro odvození korekce na supralinearitu. Na obrázku 3 je ilustrována odvozená funkce $K_{lin} = f(r)$.

Tab. 3: Experimentální data měření závislosti signálu na dávce

D (Gy)	$d(D)$	$R(D)$	$r(D)$	$d(D)/r(D)$
1.50	0.750	581	0.737	1.017
1.75	0.875	683	0.867	1.009
2.00	1.000	788	1.000	1.000
2.25	1.125	894	1.135	0.991
2.50	1.250	1003	1.273	0.982

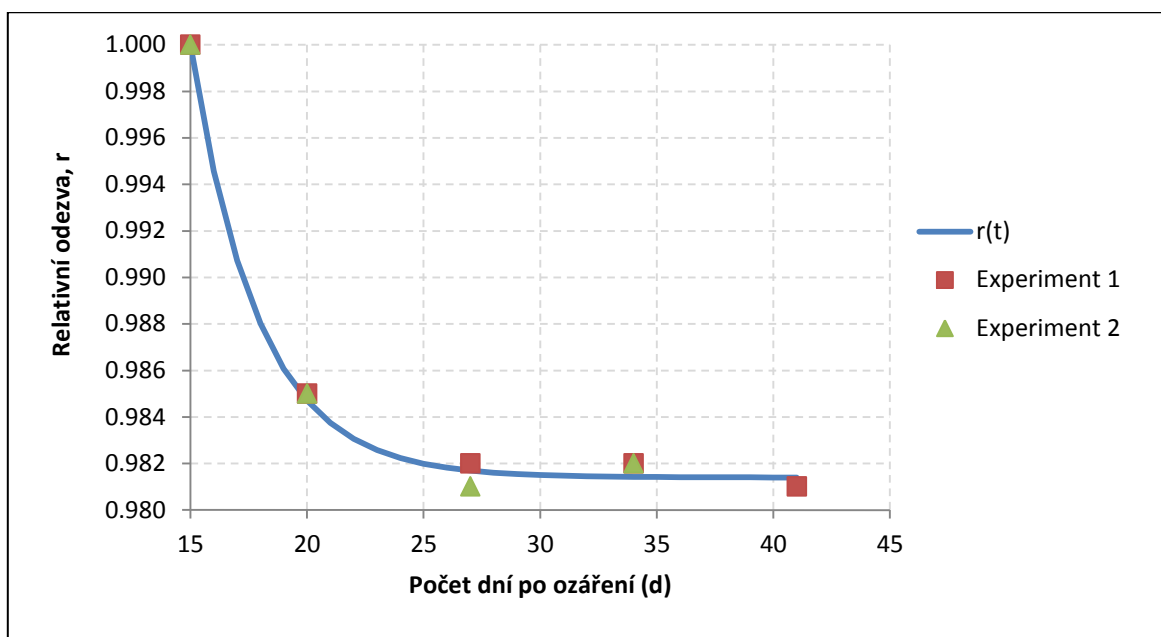


Obr. 3: Funkce $f(r)$ pro odečet hodnoty K_{lin}

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 13 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

5.4. EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÉ HODNOTY K_{fad}

Na obr. 4 je ilustrován experimentálně stanovený fading ve formě relativní odezvy $r(t)$, z něhož vychází korekce $K_{fad} = \frac{r(t_{kal})}{r(t_a)}$. Uvedené hodnoty jsou platné pro aktuálně používanou šarži TLD materiálu, označenou jako „sada 8“.



Obr. 4: Experimentálně naměřené hodnoty fadingu proložené funkcí

$$r(t) = 0.0186 \cdot \exp\left(\frac{15-t}{2.9}\right) + 0.9814$$

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 14 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

5.5. EXPERIMENTÁLNĚ STANOVENÉ NEJISTOTY MĚŘENÍ

Hodnoty nejistot měření pro svazky záření ^{60}Co , X a elektronů odvozené na základě experimentálních dat jsou shrnuty v následující tabulce:

Činitel	u_i (%)		
	^{60}Co	záření X	elektrony
R	0.65	0.71	0.73
K_{kal}	0.90	0.90	0.90
K_{en}		1.60	1.66
K_{lin}	0.58	0.58	0.68
K_{fad}	0.49	0.49	0.49
$u_D = \sqrt{\sum u_i^2}$ (%)	1.34	2.11	2.19
$U = 2 \cdot u_D$ (%)	2.69	4.22	4.38

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 15 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

6. PRAKTICKÉ POSTUPY

6.1. ANNEALING A SELEKCE TL PRÁŠKU

Annealing je procedura vedoucí ke stabilizaci dozimetrických vlastností TL prášku a odstranění zbytkového dozimetrického signálu. Musí být proveden vždy před prvním a každým opětovným dozimetrickým použitím prášku. Vždy pracujeme s TL práškem jedné výrobní sady, materiál z různých výrobních sad nikdy nemícháme dohromady. Po annealingu jsou pomocí sady sít s různou hustotou odstraněna velká a malá zrna prášku, tak aby velikost zrn použitého materiálu byla v rozmezí **75 až 200 μm** . Časový odstup mezi annealingem a ozáření prášku musí být minimálně jeden týden.

K provedení annealingu TL prášku jsou používány tyto pomůcky a materiál:

- keramická nádobka s víkem
- programovatelná pec PTW-TLDO
- síta o hustotě 75 μm a 200 μm
- laboratorní papír
- skladovací nádoba pro TL prášek s vyhovující velikostí zrn
- skladovací nádoba pro TL prášek s nevhovující velikostí zrn
- nerezová laboratorní lžička
- lepící etikety

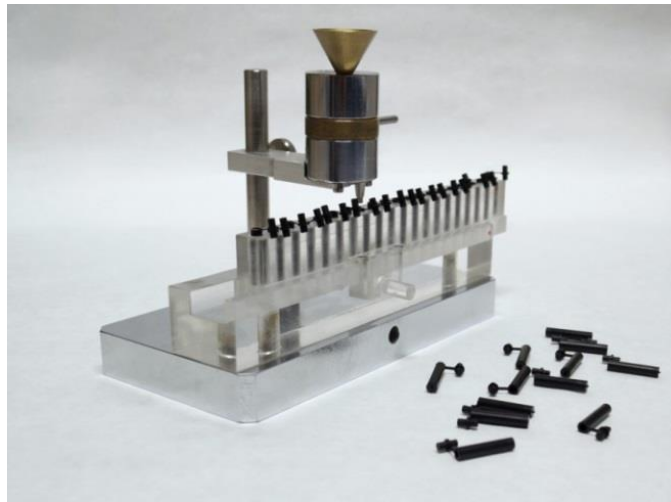
Postup provedení annealingu prášku je následující:

- 1) TL prášek vsypeme do keramické nádobky.
- 2) Uzavřenou keramickou nádobku s práškem vložíme do pece a spustíme následující program: vyhřívání při **400 °C po dobu 1 h**, ochlazení na teplotu 100 °C a vyhřívání při teplotě **100 °C po dobu 2 h**.
- 3) Po ukončení procedury vyčkáme na pokles teploty pro bezpečnou manipulaci (30 - 40 °C) a keramickou nádobu vyjmeme z pece.
- 4) Síto 200 μm upevníme nad síto 75 μm a prášek z keramické misky vsypeme do vrchního síta. Laboratorní lžičkou rozmělníme hrudky prášku vzniklé při annealingu. Krouživými a posuvnými pohyby obou sít nad plachtou laboratorního papíru a pomocí laboratorní lžičky oddělíme zrna prášku menší než 75 μm a spečená zrna a nečistoty větší než 200 μm .
- 5) Zbýlý prášek o velikosti zrn 75 - 200 μm přesypeme do skladovací nádoby, kterou opatříme etiketou s vyznačením identifikace materiálu a datem annealingu. Prášek s nevhovující velikostí zrn vsypeme do určené nádobky a opatříme popisem.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 16 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

6.2. PŘÍPRAVA DOZIMETRŮ

TL dozimetrem používaným pro TLD audit je **kapsle** z černého neprůsvitného plastu naplněná **TL práškem** (viz část 3.2.). K plnění kapslí slouží **dispenzor** (viz obr. 5). Součástí zařízení je zásobník na 20 kapslí.



Obr. 5: Dispenzor se zásobníkem a kapslemi

Postup přípravy dozimetru je následující:

- 1) Zásobník naplníme požadovaným počtem otevřených kapslí. Použijeme vždy nové kapsle.
- 2) Trychtýř dispensoru naplníme práškem, který prošel přípravou popsanou v části 6.1.
- 3) Posunem zásobníku nastavíme prázdnou kapsli pod ústí dispensoru. Plynule otočíme rotační částí dispensoru směrem k sobě a následně zpět. Ověříme, zda je příslušná kapsle naplněna až k dosahu víčka kapsle.
- 4) Krok č. 3) opakujeme pro všechny kapsle v zásobníku.
- 5) Kapsle postupně vyjmeme ze zásobníku a uzavřeme je zatlačením víčka až do krajní polohy. Odstříháme plastovou část spojující víčko s kapslí.

Tímto způsobem jsou připravovány všechny dozimetry.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 17 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

6.3. DOZIMETRICKÁ SESTAVA PRO TLD AUDIT

TLD audit je realizován korespondenčním způsobem. Na radioterapeutická pracoviště jsou zasílány dozimetrické sestavy s požadavkem na provedení příslušných procedur v předem dohodnutém termínu.

Dozimetrická sestava pro TLD audit obsahuje:

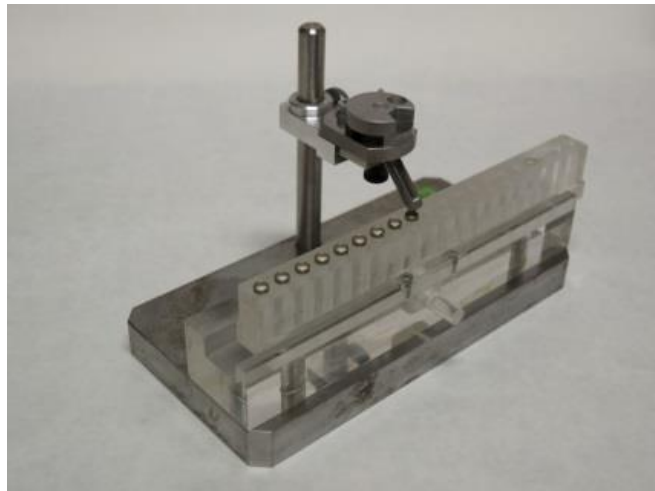
- Průvodní dopis s uvedením typu a modalit svazků, které mají být zkontrolovány. Vzory dopisů jsou uvedeny zde:
disk T\TLD audit\Dopisy\Šablony dopisů
- Sadu TL dozimetrů dle počtu kontrolovaných svazků záření (3 TLD pro 1 svazek záření). Dozimetry určené pro audit určitého svazku jsou vloženy v uzavíratelném sáčku s popiskou identifikace radioterapeutického pracoviště, typem ozařovače a tohoto svazku.
- TLD pro měření pozadí (1 TLD pro každé radioterapeutické pracoviště). Tento dozimetr je vložen v uzavíratelném sáčku s identifikací a je opatřen barevnou páskou.
- Fantomy, případně i s filmy, pro pokročilejší verze auditu (viz [1])
- Protokoly o TLD auditu, kam radioterapeutické pracoviště zaznamená požadované informace o ozáření TLD. Vzory protokolů jsou uvedeny zde:
disk T\TLD audit\Protokoly TLD auditů\Šablony protokolů

Stojánky pro fixaci TLD ve vodním fantomu [1] nejsou obvykle součástí dozimetrické sestavy, jelikož jsou jimi radioterapeutická pracoviště již vybavena. V případě TLD auditu na nově vzniklém pracovišti musí být stojánky pracovišti zaslány.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 18 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

6.4. PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MĚŘENÍ

Z jedné ozářené kapsle je třeba připravit 9 identických porcí prášku o hmotnosti přibližně 16,5 mg. Na obrázku č. 6 je **dispenzor** používaný k tomuto účelu. Součástí zařízení je zásobník pro 20 **mističek z nerezové oceli**. Mističky musí být před použitím čisté a bez zbytků prášku z předchozího měření. Mistička s porcí prášku představuje vzorek určený k TL měření. Správnou funkci dispenzoru kontrolujeme pomocí vážení vzorků.



Obr. 6: Dispenzor pro přípravu vzorků

Pro přípravu vzorků a manipulaci s nimi jsou dále třeba tyto pomůcky:

- podložka pro naplněné misky umožňující jejich bezpečný přenos
- pinzeta pro manipulaci s miskami
- nádoba na již změřený TL prášek ze vzorků s označením „změřený prášek“
- čistý štětec pro čištění dispenzoru
- laboratorní váhy

Postup přípravy vzorků pro měření je následující:

- 1) Do zásobníku připravíme devět prázdných mističek.
- 2) Prášek z kapsle vsypeme do dispenzoru.
- 3) Posunem zásobníku nastavíme prázdnou misku pod ústí dispenzoru. Plynule otočíme rotační částí dispenzoru směrem k sobě a následně zpět.
- 4) Prášek z první misky vsypeme zpět do horního otvoru dispenzoru, prázdnou a čistou misku vrátíme do zásobníku.
- 5) Krok č. 3) zopakujeme, až zaplníme všechny připravené mističky.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 19 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

- 6) Ověříme, zda po naplnění poslední mističky zůstalo v dispenzoru malé množství prášku. V případě, že v dispenzoru žádný prášek nezůstal, poslední mističku neměříme (riziko, že porce prášku je menší).
- 7) Mističky postupně vyjmeme ze zásobníku pomocí pinzety a pokládáme je na podložku. Přitom zachováme jejich pořadí.
- 8) Před zahájením práce s další kapslí dispenzor vyprázdníme do nádoby označené jako „změřený prášek“ a ověříme, že v dispenzoru nezůstaly žádné zbytky prášku. Případné zbytky prášku odstraníme štětcem.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 20 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

6.5. POSTUP PŘI MĚŘENÍ

Měření vzorků připravených dle 6.4. probíhá v **TLD čtečce Harshaw 3500 při aplikaci parametrů měření uvedených v části 5.1.** Vzorky z jedné kapsle jsou postupně za sebou měřeny. Na připojeném PC jsou v průběhu měření zobrazovány termoluminiscenční křivky (viz část 5.1.). Tvar křivek je třeba v průběhu měření vizuálně kontrolovat a zaznamenat případy anomálií (chybějící část křivky v důsledku teplotního posunu, parazitické píky z případných nečistot), aby následně TL signál z případů anomálií byl vyloučen z vyhodnocení.

Postup měření vzorků je následující:

- 1) Zapneme TLD čtečku. Vyčkáme minimálně 20 minut (proces stabilizace čtečky).
- 2) Změříme temný proud fotonásobiče a referenční světlo a porovnáme s referenčními hodnotami [4].
- 3) Provedeme několik měření s prázdnou vyhřívací planžetou.
- 4) Otevřeme zásuvku čtečky a pomocí pinzety přeneseme mističku s práškem do středu plochy ve vyhřívací planžetě. Opatrně zavřeme zásuvku.
- 5) Aktivujeme měření.
- 6) Otevřeme zásuvku čtečky a pinzetou vyjmeme misku s práškem.
- 7) Změřené misky s práškem pokládáme na podložku v pořadí, jak byly měřeny.
- 8) Po změření porcí prášku z jednotlivých dozimetrů provedeme kontrolní vážení jednotlivých vzorků pomocí laboratorních vah. V případě nesrovnalostí normalizujeme hodnoty naměřeného signálu jednotlivých vzorků vzhledem k váze.
- 9) Ze souboru naměřených odezev vyřadíme případy anomálií.
- 10) Kroky 4 až 9 opakujeme pro všechny vzorky. Přitom měření vzorků z různých kapslí od sebe oddělujeme měřením bez vzorku (s prázdnou planžetou). V případě potřeby štětečkem odstraníme z planžety případné zbytky prášku a nečistoty.
- 11) Po provedení počtu měření odpovídajících jednomu dozimetru kontrolujeme temný proud fotonásobiče a referenční světlo [4].
- 12) Změřený a zvážený prášek vysypeme z misek do nádoby opatřené popiskou s identifikací materiálu a uvedení, že se jedná o použitý (změřený) prášek.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 21 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

6.6. VYHODNOCENÍ DÁVKY

Pro účely výpočtu dávky dle vztahu $D = R \cdot K_{kal} \cdot K_{en} \cdot K_{lin} \cdot K_{fad}$ (viz část 4.1) slouží výpočtová tabulka v programu MS Excel, kam se vkládají údaje o auditovaném svazku, časové údaje, hodnoty korekčních koeficientů a naměřená data relevantní TLD auditu svazku záření, tj. naměřené hodnoty odezvy 3 dozimetrů ozářených radioterapeutickým pracovištěm v rámci auditu, 3 kalibračních dozimetrů, 1 laboratorního dozimetru pro měření pozadí a jednoho transportního dozimetru pro měření pozadí. Výsledkem je dávka D_{TLD} stanovená jako průměr dávek naměřených 3 TLD ozářenými radioterapeutickým pracovištěm a relativní odchylka této dávky D_{TLD} od hodnoty dávky D_S stanovené pracovištěm. Relativní odchylka Δ_D je dána vztahem:

$$\Delta_D = \left(\frac{D_{TLD}}{D_S} - 1 \right) \cdot 100\%$$

Výpočtová tabulka používaná pro TLD audit je na počítačích Oddělení dozimetrie zde:
disk T\TLD audit\Výpočty - protokoly\Výpočtová tabulka.xls

6.7. EVIDENCE A DOKUMENTACE DAT

Výsledky ve formě relativních odchylek $\Delta_D = \left(\frac{D_{TLD}}{D_S} - 1 \right) \cdot 100\%$ jsou ukládány do databáze TLD auditu vytvořené v programu MS Access. Tato databáze rovněž obsahuje adresní údaje radioterapeutických pracovišť, údaje o ozařovačích a dalším souvisejícím vybavení.

Přístup do databáze TLD auditu z počítačů Oddělení dozimetrie je:

disk T\TLD audit\Audit.mdb

Kromě těchto finálních výsledků jsou evidována následující vstupní data a záznamy:

- Deník měření
- Psané záznamy:
 - záznam o průběhu měření (číselná identifikace vzorků, záznam čísel vzorků s anomálií TL křivky)
 - záznam naměřených dat (TL odezvy jednotlivých vzorků)
 - záznam o výsledcích vážení vzorků
 - záznam o termínech TLD auditů, datu kalibrace a annealingu a počtu TLD zaslaných na radioterapeutická pracoviště
 - záznam o hodnotách temného proudu fotonásobiče a referenčního světla
- Výstupy aplikace WinRems (soubory naměřených dat)
- Kopie dopisů zaslaných na radioterapeutická pracoviště
- Výpočtové tabulky (protokoly) v elektronické i tištěné formě

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 22 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

6.8. PŘEDÁVÁNÍ DAT

Výsledky TLD auditů provedených pro potřeby státní inspekce jsou předávány na radioterapeutická pracoviště a SÚJB podle pravidel uvedených ve VDS 048 [3].

Vzory dopisů zasílaných na radioterapeutická pracoviště jsou uvedeny zde:

disk T\TLD audit\Dopisy\Šablony dopisů

Výsledky TLD auditů provedených na zakázku radioterapeutických pracovišť jsou předávány na pracoviště ve formě protokolu vyhotoveného nejpozději do 2 týdnů po ukončení měření.

7. ZABEZPEČENÍ JAKOSTI

7.1. METROLOGICKÉ ZABEZPEČENÍ

Použitý TLD systém je pravidelně jednou za 2 roky ověřován v Českém metrologickém institutu.

7.2. SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ

Oddělení dozimetrie se jednou ročně účastní srovnávacího měření organizovaného Mezinárodní atomovou agenturou. Toto měření spočívá v měření dávky a porovnání výsledků s referenční hodnotou.

7.3. ZKOUŠKY PROVOZNÍ STÁLOSTI

Zkoušky provozní stálosti TLD systému spočívají v záznamu a kontrole hodnot temného proudu a odezvy na vnitřní referenční světlo. Tyto kontroly probíhají v souladu s uživatelskou příručkou [4].

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 23 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

8. UPLATNĚNÍ METODIKY A NOVOST POSTUPŮ

Tato metodika byla vypracována pro účely metodického zajištění stanovení dávky v rámci korespondenčních auditů v radioterapii prováděných pro potřeby státní inspekce dle dokumentů VDS 048 [3] a Doporučení [1].

Novost postupů spočívá v inovaci technologických procedur v souvislosti se zavedením nového měřicího systému [4] a příslušenství [5] do praxe a v implementaci výstupů a poznatků získaných v rámci řešení výzkumného projektu TB01SUJB071 podporovaného TA ČR [1, 6, 7].

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M5	List: 24 ze 24
	Stanovení dávky pomocí TLD v rámci korespondenčního auditu v radioterapii	Datum účinnosti: 1.1.2015 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

9. SEZNAM LITERATURY

- [1] Doporučení. Zavedení systému jakosti při využívání významných zdrojů ionizujícího záření v radioterapii: *Korespondenční TLD audit v systému jakosti v radioterapii*. Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Praha, 2014.
- [2] Technical Report Series No. 398. *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy*. IAEA, Vienna, v platném znění
- [3] VDS 048. *Provádění a hodnocení výsledků TLD auditů v radioterapii*. Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Praha, 2012.
- [4] Uživatelská příručka. *Model 3500 Manual TLD Reader with WinRems*. Thermo Scientific, USA, 2010.
- [5] Funkční vzorek. *Dávkovač pro přípravu vzorků termoluminiscenčního prášku v rámci dozimetrických měření v radioterapii*. Zpráva č. 16/2011. Státní ústav radiační ochrany, v. v. i. Praha, 2011.
- [6] Průběžné zprávy za etapy 1 až 5. Projekt TB01SUJB071 „Výzkum ozáření populace a optimalizace radiační ochrany při lékařském ozáření v České republice“. Státní ústav radiační ochrany, v. v. i. Praha, 2012 - 2014.
- [7] Ekendahl, D., Kapucianová, M., Dufek, V. *Korespondenční TLD audit v radioterapii v ČR: současnost, zkušenosti a možnosti*. *Bezpečnost jaderné energie* 22(60), č. 3/4, 99-102 (2014)