



Státní ústav radiační ochrany, v.v.i.

Odbor dozimetrie

Bartoškova 28, 140 00 Praha 4

Metodika M4

Schválená metodika

Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados

Vypracoval

| Funkce | Jméno | Datum | Podpis |
|-------------------------------|--------------------|-------|--------|
| Výzkumný a vývojový pracovník | Ing. Zina Čemusová | | |

Přezkoumal a schválil

| Funkce | Jméno | Datum | Podpis |
|-------------------|-----------------------|-----------------|----------|
| Vedoucí odboru | Ing. Daniela Ekendahl | | |
| Archivní označení | SÚRO 261-M4-0 | Číslo revize | 0 |
| Výtisk číslo | 1 | Datum účinnosti | 1.1.2021 |

Rozdělovník

| Výtisk | Převzal | Datum | Podpis |
|--------|---------|-------|--------|
| č. 1 | | | |
| č. 2 | | | |
| č. 3 | | | |

| | | |
|---|--|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 3 ze 27 |
| | Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| 1. CÍL METODIKY | 4 |
| 2. VELIČINY, ZKRATKY A POUŽITÉ SYMBOLY | 4 |
| 2.1. VELIČINY PRO MONITOROVÁNÍ EXTERNÍHO OZÁŘENÍ V PROSTŘEDÍ | 4 |
| 2.2. ZKRATKY A SYMBOLY | 5 |
| 3. METODY, PŘÍSTROJE, MATERIÁLY A POSTUPY | 6 |
| 3.1. MĚŘÍCÍ SYSTÉM TLD RADOS..... | 6 |
| 3.1.1. AUTOMATICKÁ ČTEČKA TLD RADOS | 6 |
| 3.1.2. PC SE SW APLIKACÍ WinTLD | 7 |
| 3.1.3. OZAŘOVAČ SE ZDROJEM $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ | 7 |
| 3.1.4. DOZIMETR PROSTŘEDÍ | 8 |
| 3.2. KALIBRACE TLD SYSTÉMU | 10 |
| 3.2.1. INTERNÍ KALIBRACE SYSTÉMU V RÁMCI APLIKACE WINTLD | 10 |
| 3.2.2. KALIBRACE DOZIMETRŮ V POLI ^{137}Cs PRO ÚČELY STANOVENÍ $H^*(10)$ | 11 |
| 3.3. NEJISTOTA MĚŘENÍ | 12 |
| 3.4. PŘÍPRAVA A MĚŘENÍ DOZIMETRŮ | 13 |
| 3.5. STANOVENÍ $H^*(10)$ | 13 |
| 3.6. VALIDACE A VERIFIKACE | 13 |
| 3.7. ZÁZNAMY NEBO DOKUMENTAČNÍ VÝSTUPY | 14 |
| 4. UPLATNĚNÍ METODIKY | 14 |
| SEZNAM SOUVISEJÍCÍ LITERATURY | 15 |
| PŘÍLOHA 1: DOZIMETRICKÉ VLASTNOSTI $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ | 16 |
| PŘÍLOHA 2: PRAKTICKÉ POSTUPY PRO PŘÍPRAVU A MĚŘENÍ TLD | 19 |
| PŘÍLOHA 3: ZPRACOVÁNÍ A SPRÁVA DAT | 21 |
| PŘÍLOHA 4: CELKOVÁ NEJISTOTA STANOVENÍ $H^*(10)$ PRO DOZIMETR MM | 24 |

| | | |
|---|--|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 4 ze 27 |
| | Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

1. CÍL METODIKY

Metodika je určena pro stanovení prostorového dávkového ekvivalentu pomocí systému termoluminiscenční dozimetrie (TLD) Rados. Metodika byla připravena s cílem realizace požadavků vyplývajících z Vyhlášky SÚJB 360/2016 Sb. o monitorování radiační situace [1] v oblasti monitorování dávek zevního ozáření - v tomto smyslu se vztahuje k příloze č. 3 tabulkám č. 2 až 8, písm. A, uvedené Vyhlášky.

2. VELIČINY, ZKRATKY A POUŽITÉ SYMBOLY

2.1. VELIČINY PRO MONITOROVÁNÍ EXTERNÍHO OZÁŘENÍ V PROSTŘEDÍ

Základními veličinami radiační ochrany pro případ externího ozáření jsou ekvivalentní dávka a efektivní dávka. V těchto veličinách jsou vyjádřeny limity [2].

Ekvivalentní dávka H_T je součin radiačního váhového faktoru w_R uvedeného v [2] a střední absorbované dávky D_{TR} v orgánu či tkáni T pro ionizující záření R, nebo součet takových součinů, jestliže pole ionizujícího záření je složeno z více druhů nebo energií:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{TR}$$

Efektivní dávka E je součet součinů tkáňových váhových faktorů w_T uvedených v [2] a ekvivalentní dávky H_T v ozářených tkáních nebo orgánech T:

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

Efektivní dávka není měřitelná a k jejímu odhadu je využívána operační veličina prostorový dávkový ekvivalent.

Prostorový dávkový ekvivalent $H^*(10)$ je dávkový ekvivalent vytvořený rozšířeným a usměrněným polem záření v hloubce $d = 10$ mm v kouli ICRU na poloměru směřujícím proti směru uspořádání pole.

$H^*(10)$ souvisí s dozimetrickými a fyzikálními veličinami (K_a , Φ) převodními vztahy uvedenými v ICRP 74 [3]. Vztahy mezi E a $H^*(10)$ jsou ilustrovány v [4].

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 5 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

2.2. ZKRATKY A SYMBOLY

| Zkratka/symbol | Popis/vysvětlení |
|-----------------------------------|--|
| Al ₂ O ₃ :C | Oxid hlinitý s příměsí uhlíku |
| ČMI | Český metrologický institut |
| LS | Laboratorní skupina |
| ML | Měřicí laboratoř |
| MM | Měřicí místo |
| MS | Mobilní skupina |
| OD | Odbor dozimetrie |
| RC | Regionální centrum |
| RMS | Radiační monitorovací síť |
| SÚJB | Státní úřad pro jadernou bezpečnost |
| SÚRO | Státní ústav radiační ochrany |
| TL | Termoluminiscence, termoluminiscenční |
| TLD | Termoluminiscenční dozimetr/dozimetrie |

| | | |
|--|--|--|
| Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 6 ze 27 |
| | Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

3. METODY, PŘÍSTROJE, MATERIÁLY A POSTUPY

3.1. MĚŘÍCÍ SYSTÉM TLD RADOS

Měřicí **system TLD Rados** zahrnuje:

- Automatickou čtečku TLD Rados s kapacitou měření cca 50 dozimetrů (karet) za hodinu s příslušenstvím (zásobníky na TLD)
- PC se SW aplikací WinTLD pro řízení měření a záznam dat
- Ozařovač TLD s uzavřeným zdrojem záření $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ pro interní kalibraci systému
- Dozimetry prostředí ve formě plastových kazet se 3 vyjímatelnými detektory $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$, které jsou vloženy do hliníkového kontejneru
- Příslušenství a spotřební materiál

3.1.1. AUTOMATICKÁ ČTEČKA TLD RADOS

Základním úkolem TLD čtečky je vyvolat a změřit TLD signál. Ozářený dozimetr je tedy nejprve prudce zahřát a uvolněné luminiscenční (světelné) záření je kvantitativně zachyceno. Celá vyhřívací část čtečky Rados pracuje v atmosféře dusíku. Dozimetr je vyhříván při volitelně nastavených teplotních parametrech. Emitované luminiscenční světlo je poté registrováno fotonásobičem. Výstupem je četnost impulsů úměrná množství emitovaného světla. Na připojeném PC se v průběhu měření zobrazují termoluminiscenční křivky. Čtečka (obr. 1) je opatřena mechanismy, které umožňují automatické měření dozimetrických karet ze zásobníků. Jeden zásobník může obsahovat až 20 karet. Podrobný popis čtečky včetně popisu všech funkcí je uveden v [5, 6]. Pro udržení dlouhodobé kvality měření je nutné provádět pravidelnou kontrolu a údržbu čtečky, a to alespoň dvakrát ročně. Tato kontrola probíhá v souladu s uživatelskou příručkou [6].

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 7 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |



Obr. 1: Automatická TLD čtečka Rados

3.1.2. PC SE SW APLIKACÍ WinTLD

Součástí TLD systému Rados je PC se SW aplikacemi pro řízení a kontrolu TLD čtečky, zadávání typů detektorů, parametrů jejich měření a záznam a dílčí zpracování naměřených dat. Jedná se o dvě SW aplikace TLD Server a TLD Explorer, jejichž účel a funkce jsou popsány níže.

SW aplikace TLD Server

Aplikace TLD Server slouží k řízení a kontrole TLD čtečky. Prostřednictvím této aplikace lze spustit/vypnout měření s předem nastavenými parametry, provádět přístrojový annealing a zadávat a sledovat důležité parametry jako stabilita odezvy na vnitřní světelný zdroj, stabilita přívodu a teploty N₂, stabilita teploty fotonásobiče, kontrola měřených dozimetřů, podrobnosti viz [5, 6].

SW aplikace TLD Explorer

Aplikace TLD Explorer umožňuje zadávat parametry měření pro jednotlivé typy detektorů, provádět úkony kalibrace systému (stanovení požadových hodnot jednotlivých detektorů v kartě, stanovení koeficientů citlivosti jednotlivých detektorů v kartě, stanovení koeficientu citlivosti čtečky), provádět úkony správy a nakládání s naměřenými daty (databáze, třídění dat, výstupy dat). Dílčí postupy pro provádění těchto procedur jsou uvedeny v [5] a kapitole 3.2.

3.1.3. OZAŘOVAČ SE ZDROJEM ⁹⁰Sr/⁹⁰Y

URZ ⁹⁰Sr/⁹⁰Y emituje beta záření s maximální energií 2.27 MeV. Aktivita zdroje je 37 MBq (ke dni 22.8.1997), což poskytuje expoziční příkon 0.94 mSv na 1 ozáření (ke stejnému dni). Poločas přeměny ⁹⁰Sr/⁹⁰Y je T_{1/2} = **29.12 roků** [7]. Tento zdroj se užívá jako kalibrační ozařovač pro kalibraci systému a je klasifikován jako drobný zdroj záření.

| | | |
|--|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 8 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

3.1.4. DOZIMETR PROSTŘEDÍ

Dozimetr je tvořen 3 TL detektory $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ je ve formě pevných disků o průměru 4.5 mm a výšce 1 mm (výrobce Uralský polytechnický institut, Rusko), plastovou kartou pro umístění detektorů, plastovým obalem karty a vnějším hliníkovým kontejnerem (viz obr. 2). Dozimetr je opatřen identifikačním číslem vyraženým na kartě. Hliníkový kontejner je vodotěsný. Dozimetry je přesto vhodné opatřovat vnějším ochranným obalem z polyetylenu pro pobyt v MM. Vlastnosti dozimetru jsou dány především dozimetrickými vlastnostmi detektoru $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ a částečně i vnějším hliníkovým kontejnerem, který modifikuje energetickou závislost odezvy dozimetru.



Obr. 2: Součásti TLD (karta s detektory, obal karty, hliníkový kontejner)

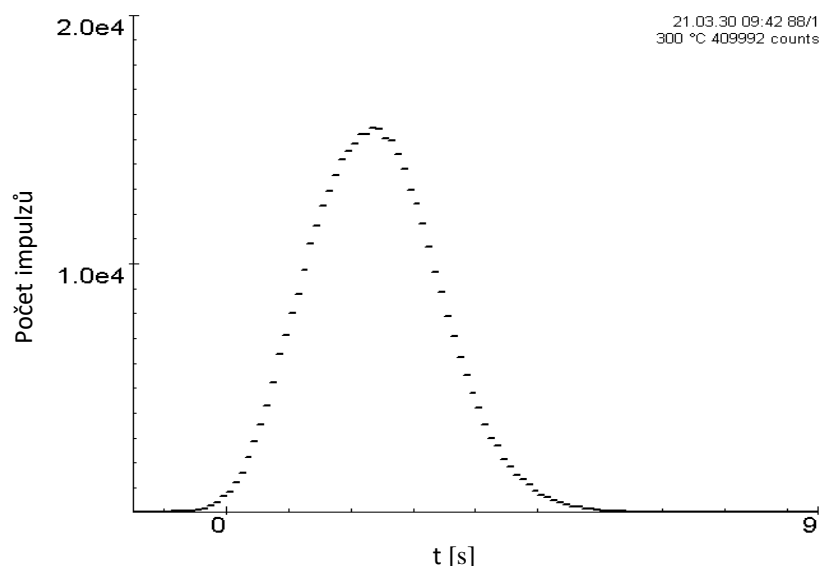
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ je termoluminiscenční materiál vykazující jednoduchou TL křivku s píkem při teplotě kolem 209°C . Vyhřívací křivku po měření zahrnujícím aplikaci předeřevu při teplotě 300°C po dobu 1.5 s následovaného čtením TL signálu při teplotě 300°C po dobu 9.5 s ilustruje obr. 3. Integrálem TL křivky je určena velikost TL signálu. Velikost píku velmi silně závisí na rychlosti vyhřívání, při nárůstu rychlosti vyhřívání klesá velikost píku a tedy i citlivost. Nevýhodou tohoto materiálu je citlivost na světlo. Z důvodu světlem vyvolaného transferu náboje mezi elektronovými pastmi dochází při neúplném zastínění detektorů ke vzniku parazitických píků na začátku čtení, což vede k nežádoucímu nárůstu celkového signálu. Na druhou stranu dochází k redukci hlavního dozimetrického píku. Při manipulaci s dozimetry je proto třeba zabránit nežádoucímu vystavení detektorů světlu a nevyjímat kartu z obalu. Automatická TLD čtečka pracuje s kartami vloženými do obalu karty. K otevření obalu pro změření TL signálu jednotlivých detektorů dochází uvnitř čtečky. $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ však přesto vykazuje řadu vlastností, pro které je vhodným detektorem v dozimetrii životního prostředí. Jedná se především o vysokou citlivost, velmi nízkou míru fadingu a příznivou energetickou závislost. Při zavádění nových

| | | |
|--|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 9 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

detektorů do systému je třeba provést annealing v peci při teplotě 400°C po dobu 1 h. Následně při běžném použití pro účely dozimetrie životního prostředí postačuje krátký přístrojový annealing [8].

Výše popsaný dozimetr splňuje požadavky příslušné normy [9]. V **Příloze 1** jsou shrnuty výsledky testů vybraných dozimetrických parametrů zvláště důležitých z hlediska vyhodnocení výsledků.

Hlavní dozimetrické vlastnosti Al₂O₃:C významné z hlediska monitorování prostředí jsou stručně shrnuty v tabulce 1. Uvedená data vychází z [8], resp. z experimentálních měření. Podrobnosti k vybraným významným dozimetrickým vlastnostem Al₂O₃:C včetně experimentálních dat jsou součástí **Přílohy 1**



Obr. 3: Vyhřívací křivka Al₂O₃:C

Tab. 1: Souhrn dozimetrických vlastností Al₂O₃:C

| | |
|--|--------------------------------|
| Detekční práh | 1.4 μGy |
| Pozadový signál (odezva detektoru po annealingu) | 1.6 μGy |
| Fading za 100 dní | zanedbatelný |
| Fotonová energetická závislost pro 65 keV vzhledem k ¹³⁷Cs | 1.4 |
| Lineární oblast závislosti odezvy na dávce | minimálně 0.1 – 500 mSv |

| | | |
|--|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 10 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

3.2. KALIBRACE TLD SYSTÉMU

3.2.1. INTERNÍ KALIBRACE SYSTÉMU V RÁMCI APLIKACE WINTLD

Interní kalibrace TLD systému Rados zahrnuje stanovení parametrů a koeficientů, kterými jsou korigovány hrubé naměřené odezvy Ω detektorů v rámci každého dozimetru. Jedná se o:

- pozadí (naměřená odezva neozářeného detektoru), B_i
- koeficient citlivosti čtečky, K_{Ri}
- individuální koeficienty citlivosti, K_{Si} , stanovované pro každý jednotlivý detektor.

Tato interní kalibrace se provádí při zavádění nových dozimetrů do systému, resp. po každém annealingu v peci. Stanovení těchto faktorů se provádí ve výše uvedeném pořadí.

Stanovení pozadí

Jednotlivé dozimetry se podrobí přístrojovému annealingu a okamžitě poté následuje jejich měření. Získané odezvy Ω reprezentují hodnoty pozadí B_i každého detektoru v rámci každého dozimetru. Tato operace se řídí postupem podle [5]. Hodnoty B_i jsou součástí databáze WinTLD a aplikují se pro všechna měření s danými dozimetry do doby nového překalibrování.

Stanovení koeficientu citlivosti čtečky

Ze skupiny dozimetrů se vyberou 2 dozimetry, které zůstanou vyčleněny pro tento účel. Dozimetry se nejprve podrobí přístrojovému annealingu následovanému ozářením 1 expozicí pomocí ozařovače. Získané odezvy Ω se využijí pro stanovení citlivosti čtečky. Tato operace následuje operaci stanovení pozadí a provádí se podle [5]. Citlivost čtečky C_{Ri} pro pozici elementu i (1 až 3) je dána vztahem:

$$C_{Ri} = \langle \Omega_i - B_i \rangle / \text{expozice}$$

kde $\langle \Omega_i - B_i \rangle$ je průměr naměřené odezvy po odečtu pozadí daného detektoru v pozici i .

Vzhledem k tomu, že citlivost čtečky se v čase může měnit, musí být hodnota C_{Ri} aktualizována před každým měřením. V této souvislosti se stanovuje koeficient citlivosti čtečky K_{Ri} vztahem:

$$K_{Ri} = C_{Ri}(\text{platný v době stanovení } K_{Si}) / C_{Ri}(\text{aktuálně platný})$$

Stanovení koeficientů citlivosti pro jednotlivé detektory

Všechny dozimetry skupiny se podrobí přístrojovému annealingu následovanému okamžitým ozářením 1 expozicí ozařovače. Poté se provede měření a získané odezvy Ω_i se využijí pro stanovení K_{Si} (pro každý detektor) podle [5]. Získané hodnoty K_{Si} jsou součástí databáze WinTLD a aplikují se do doby nového překalibrování systému.

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 11 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

$$K_{Si} = \text{expozice} \cdot K_{Ri} / (\Omega_i - B_i)$$

Výstupní naměřené odezvy

Výstupní naměřené korigované hodnoty O_i ze systému Rados pak pro i -tý detektor v kartě mají tvar:

$$O_i = (\Omega_i - B_i) \cdot K_{Ri} \cdot K_{Si}$$

Tyto hodnoty jsou dalším předmětem zpracování v souladu s postupem uvedeným v **Příloze 3**. Výstupní naměřené hodnoty jsou po provedení operace Export v rámci SW WinTLD ukládány do ASCII souboru, který se dále zpracovává aplikací TLD-RMS [10] v souladu s metodikou [11].

3.2.2. KALIBRACE DOZIMETRŮ V POLI ^{137}Cs PRO ÚČELY STANOVENÍ $H^*(10)$

Smyslem kalibrace systému je umožnit měření různých radiálních polí. Základní kalibrační data jsou dána ozářením skupiny (obvykle 2 ks) dozimetrů kalibračním zdrojem ^{137}Cs v akreditované kalibrační laboratoři nebo v certifikované laboratoři (ČMI) za referenčních podmínek pro $H^*(10) = 1 \text{ mSv}$. Ozáření se provádí v hliníkových kontejnerech volně ve vzduchu. Naměřené hodnoty se následně zavádějí do aplikace TLD-RMS, kde dochází ke stanovení kalibračního faktoru K_{kal} a jeho aplikaci při zpracování naměřených dat dle [10]. Výpočet K_{kal} probíhá podle vzorce

$$K_{kal} = H^*(10)_K / (O_K - O_P)$$

kde $H^*(10)_K$ je referenční hodnota prostorového dávkového ekvivalentu, na kterou byly ozářeny kalibrační dozimetry, O_K je průměrná odezva kalibračních dozimetrů, O_P je průměrná odezva pozadových dozimetrů ke kalibračním. Ozáření kalibračních dozimetrů se provádí v den měření (vyhodnocení) monitorovacích TLD. Vzhledem k zanedbatelnému fadingu $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ (viz **Příloha 1**) je však možné toto ozáření provést kdykoliv během monitorovacího období.

Z výše popsaných postupů vyplývá, že z každé skupiny TLD musí být vyčleněny dozimetry určené ke specifickému kalibračnímu účelu a které jsou pro tento účel opakovaně používány. Podrobnosti jsou uvedeny v **Příloze 2**.

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 12 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

3.3. NEJISTOTA MĚŘENÍ

Z vyhodnocení vlastních experimentálních měření (viz **Příloha 1**) vyplývá, jak se níže uvedené faktory podílejí na celkové nejistotě stanovení H*(10) – viz tabulka 2:

Tab. 2: Faktory podílející se na celkové nejistotě stanovení H*(10)

| Faktor | Příspěvek nejistoty u_i |
|--|---------------------------|
| Fading | 1% |
| B_i | 0.2% |
| K_{Ri} | 2% |
| K_{Si} | 1% |
| Kalibrace ^{137}Cs | 2% |
| Energetická závislost | 18% |
| Nejistota (maximální - při souběhu všech faktorů) | 18% |
| $u = \sqrt{\sum_i u_i^2}$ | |
| U(k=2) maximální rozšířená nejistota stanovení H*(10) | 36% |
| $U = 2 \cdot u$ | |

Uvedený výsledek neznámá, že měření jsou přesná pouze v rámci uvedené nejistoty, ale že měření může být zatíženo až takto velkou chybou, v ojedinělých případech, kdy všechny uvedené faktory současně přispívají k chybě ve stejném směru.

| | | |
|---|--|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 13 ze 27 |
| | Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

3.4. PŘÍPRAVA A MĚŘENÍ DOZIMETRŮ

Příprava dozimetrů pro monitorování spočívá v provedení přístrojového annealingu pomocí čtečky při parametrech uvedených v **Příloze 2**. Annealing v peci se provádí pouze při zavádění skupiny nových TLD do systému a pak alespoň jednou za 5 let nebo v případě potřeby (předchozí měřený $H^*(10)$ větší než 100 mSv). Po provedení annealingu jsou dozimetrické karty vloženy do hliníkových kontejnerů, které jsou pro případ venkovního monitorování ještě uzavřeny do polyetylenového obalu. Dozimetr je takto připraven k umístění do měřicího místa. Po uplynutí doby monitorování je dozimetr vyzvednut v měřicím místě a dopraven do laboratoře. Dozimetrická kazeta se vyjímá z hliníkového kontejneru těsně před měřením. Měření čtečkou probíhá při parametrech uvedených v **Příloze 2**. V jednotlivých fázích monitorovacího období jsou zaznamenávány veškeré časové údaje týkající se historie dozimetru (datum annealingu, datum počátku monitorování, datum konce monitorování, datum měření).

3.5. STANOVENÍ $H^*(10)$

K přepočtu výstupních naměřených odezev na $H^*(10)$ se používá kalibrační faktor K_{kal} (viz kapitola 3.2.2.). Vypočtené hodnoty $H^*(10)$ odpovídají časovému období od annealingu do měření. Ve většině případů je však předmětem zájmu hodnota dávkového ekvivalentu vztahujícího se k měřicímu místu (MM), $H^*(10)_{MM}$. Odpovídá-li $H^*(10)_P$ dávkovému ekvivalentu mimo místo měření (krátký pobyt dozimetru v laboratoři před/po umístění do MM, transport dozimetru, apod.), pak obecně platí:

$$H^*(10)_{MM} = H^*(10) - H^*(10)_P$$

$H^*(10)_P$ se přitom stanovuje pomocnými dozimetry (laboratorní, transportní).

Algoritmy pro stanovení $H^*(10)_{MM}$ v případě dozimetrů používaných v rámci TLD sítě RMS ČR jsou uvedeny v [11]. Jednotlivé procedury procesu zpracování a správy dat sítě TLD jsou uvedeny v **Příloze 3**. V **Příloze 4** jsou uvedeny **výpočty nejistoty stanovení** $H^*(10)_{MM}$ pro dozimetr MM TLD sítě jak pro normální tak i havarijní radiační situaci. Uvedené modely vychází z provozního režimu TLD sítě popsaného v [11].

3.6. VALIDACE A VERIFIKACE

Tato metodika vychází z využití komerčně dostupného typově schváleného TLD systému splňujícího kritéria příslušné normy [9]. Základním nástrojem verifikace metodiky jsou srovnávací měření, o kterých jsou vypracovávány zprávy [12]. Metodika je rovněž verifikována v rámci pravidelného ověření v ČMI.

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 14 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

3.7. ZÁZNAMY NEBO DOKUMENTAČNÍ VÝSTUPY

Laboratorní dokumentace k TLD měření sestává z kopií nebo originálů průvodních listů, výstupu z aplikace TLD Explorer a záznamů o kalibraci TLD systému. Výsledky pořízené v rámci provozu sítě TLD RMS ČR jsou uchovávány v rámci webové aplikace TLD-RMS, odkud jsou exportovány do aplikace MonRaS provozované SÚJB. V případě výsledků pořízených mimo oblast sítě TLD RMS ČR jsou archivovány protokoly naměřených výsledků. Vzor protokolu je součástí **Přílohy 3**.

4. UPLATNĚNÍ METODIKY

Tato metodika byla vytvořena pro účely doplnění systému RMS, jejímž řízením je pověřen SÚJB a SÚRO se zde podílí na zajištění monitorování dávek prostředí. Teritoriální síť TLD spolu s lokálními sítěmi v okolí elektráren Dukovany a Temelín čítá přes 200 měřících míst, přičemž v každém probíhá výměna dozimetru jednou za tři měsíce. V současné době je pro tyto účely využíván systém TLD Harshaw 6600 [13]. Zde popisovaný systém Rados může sloužit jako doplňkový systém pro porovnání a kontrolu v případě problematického vyhodnocení dávky v některém měřícím místě, při přetížení systému TLD Harshaw 6600 (např. v havarijní situaci) nebo při výpadku systému TLD Harshaw 6600 z důvodu technické závady na přístroji. Bylo ověřeno, že svými vlastnostmi je systém Rados srovnatelný se systémem Harshaw 6600 a je tak vhodným zástupcem, nejen v rámci radiační monitorovací sítě, ale všude tam, kde je zapotřebí provést měření prostorového dávkového ekvivalentu.

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 15 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

SEZNAM SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

1. Vyhláška SÚJB 360/2016 Sb. o monitorování radiační situace v platném znění
2. Vyhláška SÚJB 422/2016 Sb. o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje v platném znění
3. ICRP Publication 74. *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation*. ICRP (1997)
4. ICRU Report 57. *Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation*. ICRU (1998)
5. User's manual. *WinTLD PRO 1235-122*. Mirion Technologies (2008)
6. Technická dokumentace k TLD systému Rados
7. Turner, J.E. *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim. ISBN 978-3-527-40606-7 (2007)
8. McKeever, S., Moscovitch, M. Townsend, P.D. *Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses*. Nuclear Technology Publishing (1995)
9. ČSN EN 62387. *Pasivní integrující dozimetrické systémy pro osoby, pracoviště a prostředí pro monitorování fotonového a beta záření*. (v aktuálním znění)
10. Aplikace TLD-RMS – verze 1.17. Uživatelská příručka. ENVINET a.s. (2010)
11. Metodika SÚRO **M3**. Stanovení H*(10) pomocí integrálních dozimetrů v rámci RMS. SÚRO 141–16.7-x, aktuální znění. Státní ústav radiační ochrany, Odbor dozimetrie
12. Ekendahl, D., Matzner, J., Kapuciánová, M., Judas L. *Srovnávací měření TLD – závěrečná zpráva*. Státní ústav radiační ochrany, Státní úřad pro jadernou bezpečnost. (2006, 2009)
13. Metodika SÚRO **M2**. Stanovení H*(10) a H'(0.07) systémem TLD Harshaw 6600. SÚRO 141-07.4-x, aktuální znění. Státní ústav radiační ochrany, Odbor dozimetrie
14. ISO. Guide to the expression of uncertainty in measurement. ISO (v aktuálním znění)

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Česká republika Státní ústav radiační ochrany | Metodika M4 | List: 16 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

PŘÍLOHA 1: DOZIMETRICKÉ VLASTNOSTI $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$

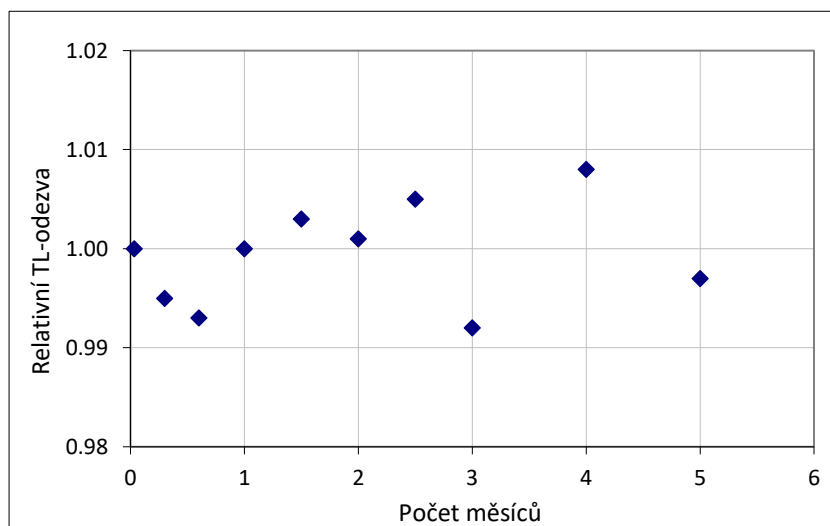
a) Detekční práh detektoru $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$

Byl testován soubor 4 dozimetrů. Detekční práh detektoru byl určen jako trojnásobek střední kvadratické odchylky pozadového signálu neozářených dozimetrů (odezva bezprostředně po annealingu). Detekční práh tak vychází na **1.4 μGy** . Dozimetr tedy splňuje příslušný požadavek dle [9].

b) Fading

20 kusů dozimetrů bylo shodně ozářeno zdrojem Sr-90 (≈ 1 mSv) a poté skladováno v laboratorních podmínkách při teplotě kolem 25°C . Dozimetry byly postupně měřeny. Jejich odezvy byly přitom korigovány na přírodní radiační pozadí, jehož hodnota v místě skladování byla 125 nSv/h. Dozimetry byly postupně měřeny v období 5 měsíců. Naměřené odezvy byly normalizovány vzhledem k hodnotě naměřené 1 den po ozáření. Výsledky měření jsou vyneseny na obrázku 4. Bylo zjištěno, že změny citlivosti v uvedeném časovém intervalu jsou menší než $\pm 1\%$, jak ilustruje obr. 4. Z výsledku vyplývá, že ozáření kalibračních dozimetrů je v praxi možno provádět libovolnou dobu během daného monitorovacího období před měřením.

Obr.4: Fading $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$

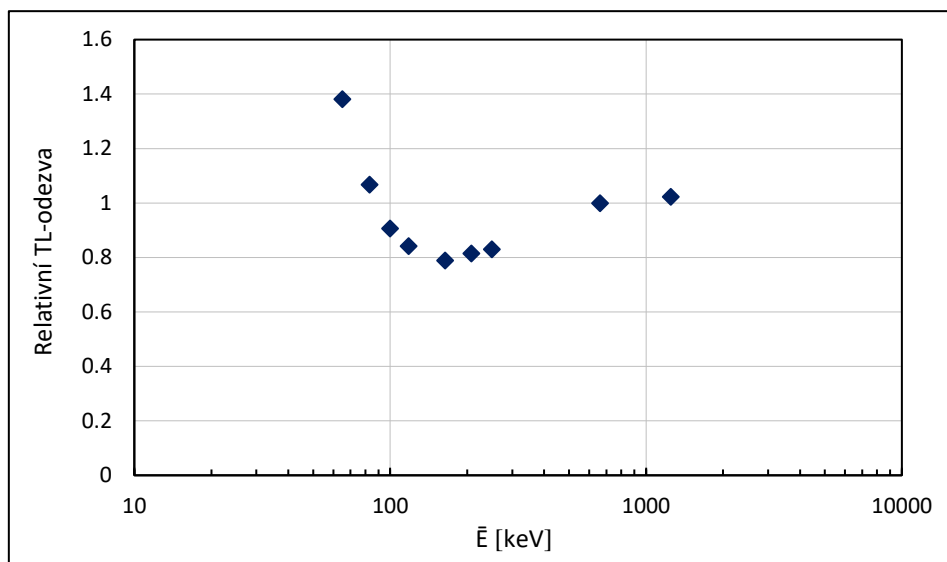


| | | |
|---|--|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 17 ze 27 |
| | Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

c) Energetická závislost

Byl prováděn test dozimetru (nikoliv pouze detektoru $Al_2O_3:C$) a karta s $Al_2O_3:C$ byla tedy vložena do hliníkového kontejneru, který modifikuje energetickou závislost dozimetru. Energetická závislost byla sledována pro efektivní energie záření X a gama v rozmezí od 65 keV do 1250 keV. Dozimetry byly ozářeny k hodnotě $H^*(10) \approx 1$ mSv. Relativní odezvy normalizované vzhledem k energii ^{137}Cs jsou znázorněny na obr.5. Vyšší odezva byla zaznamenána u energií do 70 keV. Pak naopak dochází k postupnému poklesu odezvy (minimum při $\bar{E} = 164$ keV). V oblasti energií nad 600 keV dochází k ustálení energetické závislosti. Variace odezvy v celém rozsahu energií nepřesahují 40%.

Obr. 5: Energetická závislost dozimetru

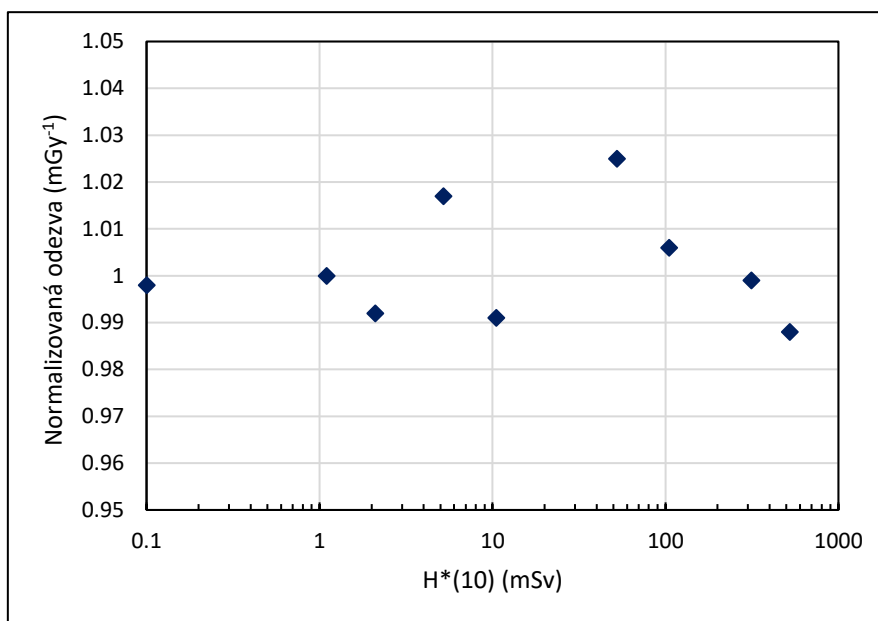


| | | |
|--|--|--|
| Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 18 ze 27 |
| | Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

d) Linearita

Karty byly ozařovány kalibračním zdrojem tak, aby vykazovaly hodnoty $H^*(10)$ od 0.1 do 524 mSv. Na obrázku 6 jsou shrnuty relativní odezvy normalizované vzhledem k odezvě pro 1.1 mSv. Rozdíly mezi jednotlivými hodnotami v tabulce nepřesahují 10%, čímž je splněn požadavek dle [9].

Obr. 6: Normalizovaná závislost odezvy na dávce vztažená na jednotku aplikované hodnoty $H^*(10)$



e) Reprodukovatelnost

Reprodukovatelnost odezvy při vícenásobném měření byla testována tak, že soubor 30 TL elementů $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ (tj. 10 dozimetrů) byl ozářen celkem 10x na hodnotu 0.5 mSv. Variační koeficienty pro jednotlivé dozimetry nepřesáhly hodnotu 2% a variační koeficient pro celou skupinu dozimetrů byl 4%. Tyto výsledky vyhovují požadavku dle [9].

| | | |
|---|--|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 19 ze 27 |
| | Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

PŘÍLOHA 2: PRAKTICKÉ POSTUPY PRO PŘÍPRAVU A MĚŘENÍ TLD

A) Skupiny $Al_2O_3:C$ - členění dozimetrů

Detektory $Al_2O_3:C$ jsou členěny do 3 skupin na základě citlivosti a výrobní šarže. Tyto skupiny jsou v systému značeny jako: $Al_2O_3:C$ (I), $Al_2O_3:C$ (II) a $Al_2O_3:C$ (III). V tabulce 3 jsou uvedeny čísla dozimetrů náležejících do dané skupiny:

Tab. 3: Rozdělení dozimetrů do skupin

| Skupina | Dozimetry |
|-------------------|----------------------|
| $Al_2O_3:C$ (I) | 1 - 170, 1001 - 1240 |
| $Al_2O_3:C$ (II) | 171 - 700 |
| $Al_2O_3:C$ (III) | 701 - 994 |

B) Annealing

Annealing detektorů $Al_2O_3:C$ v peci se provádí při teplotě **400°C po dobu 1 hod.** Annealing v peci se provádí pouze při zavádění skupiny nových TLD do systému a pak alespoň jednou za 5 let nebo v případě potřeby (předchozí měřený $H^*(10)$ větší než 100 mSv).

Přístrojový annealing dozimetrů všech skupin se provádí při aplikaci teploty 300°C po dobu 12 s.

C) Parametry měření

Vzhledem k odlišné citlivosti vyžaduje každá skupina vlastní teplotní a časový režim pro **měření dozimetrů** – viz tabulka 4:

Tab. 4: Teplotní a časový režim pro měření dozimetrů

| Skupina | Teplota (°C) | Doba předehřevu (s) | Doba čtení (s) |
|-------------------|--------------|---------------------|----------------|
| $Al_2O_3:C$ (I) | 300°C | 1.5 | 9.5 |
| $Al_2O_3:C$ (II) | 300°C | 2.0 | 7.5 |
| $Al_2O_3:C$ (III) | 300°C | 1.5 | 8.5 |

Pro účely jednoho měření (v rámci jedné oblasti RMS) nemohou být kombinovány dozimetry různých skupin.

| | | |
|--|--|--|
| Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 20 ze 27 |
| | Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

D) Kalibrace systému

Pro stanovení koeficientu citlivosti čtečky a pro stanovení kalibračního faktoru jsou z každé skupiny vyčleněny následující dozimetry (viz tabulka 5), které jsou používány výhradně pro tento účel:

Tab. 5: Dozimetry vyčleněné pro stanovení koeficientu citlivosti čtečky K_{Ri} a pro stanovení kalibračního faktoru K_{kal}

| Skupina | Dozimetry pro K_{Ri} | Dozimetry pro K_{kal} |
|---|------------------------|-------------------------|
| Al ₂ O ₃ :C (I) | 166 - 167 | 168 – 169, 170 (pozadí) |
| Al ₂ O ₃ :C (II) | 171 - 172 | 173 – 174, 175 (pozadí) |
| Al ₂ O ₃ :C (III) | 701 - 702 | 703 – 704, 705 (pozadí) |

Pro jednotlivé dozimetry se v rámci skupiny stanovují individuální hodnoty pozadí a individuální koeficienty citlivosti. Aktuálně platné hodnoty těchto parametrů jsou součástí databáze WinTLD.

E) Postup přípravy a měření TLD

Příprava TLD pro umístění do měřicího místa spočívá v přístrojovém annealingu, který se provádí v souladu s [5]. Po zapnutí čtečky se vyčká na její stabilizaci (cca 30 min). Poté je uvolněn přívod N₂, přičemž se zkontroluje hodnota indikovaná na tlakoměru, správná hodnota je 0.5 až 0.6 MPa. Vyčká se na stabilizaci teploty (cca 3 min). Prostřednictvím WinTLD Server je spuštěn přístrojový annealing požadovaných dozimetrů. „Vymazané“ dozimetrické karty jsou vloženy do hliníkových kontejnerů, které jsou pro správnou identifikaci opatřeny štítkem. Toto přiřazení probíhá v souladu s připraveným průvodním listem dozimetrů. V případě venkovního monitorování jsou dozimetry uzavřeny do polyetylenových sáčků. Spolu s monitorovacími TLD jsou stejným způsobem připraveny i pomocné dozimetry sloužící pro určení dávky mimo měřicí místo (laboratorní, transportní).

Před měřením TLD po skončení monitorovacího období se provede kalibrace systému spočívající ve stanovení aktuální hodnoty K_{Ri} a K_{kal} (dle [5]). Následně jsou změřeny monitorovací i pomocné TLD v souladu s [5] dle patřičného průvodního listu. Dozimetrické karty jsou před měřením vyjmuty z kontejnerů a vloženy do zásobníků pro měření příslušných ke čtečce. Příprava čtečky pro měření probíhá stejně jako v případě mazání dozimetrů. Prostřednictvím WinTLD Server je spuštěno měření. Správné parametry měření (tab. 4) jsou čtečkou zvoleny automaticky na základě číselného kódu dozimetru.

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 21 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

PŘÍLOHA 3: ZPRACOVÁNÍ A SPRÁVA DAT

Naměřená data jsou automaticky ukládána v SW aplikaci WinTLD Explorer, odkud je lze exportovat do souboru **C:\Program files\Rados\WinTLD\Pellet**. Pro práci s výstupními daty má soubor na ploše PC zástupce Results.txt, který je přenášen do PC v síti SÚRO k dalšímu zpracování. Ukázkou takového souboru obsahuje obr. 7. Pro identifikaci a rozdělení hrubých naměřených dat v rámci RMS je využíván společný disk skupiny TLD – **SURO fileserver (ironload):tld (S:)**, kde byla zřízena složka **OD\RMS export Rados**. Soubor Results.txt je zde uložen pod novým názvem podle vzoru **oblastrok_čtvrtletí.txt**, kde se rok zadává dvěma posledními číslicemi a čtvrtletí pořadovým číslem. V případě potřeby může být název dále upřesněn. Podrobnosti jsou uvedeny v tab. 6. Značení ostatních výstupních souborů monitorování prostředí je věcí volby podle konkrétní situace.

Obr. 7: Formát výstupního souboru

```

3.3.2021 10:41:26 000014 0000014017 0000014565 0000015002 0000000000
3.3.2021 10:42:37 000017 0000013376 0000014011 0000014768 0000000000
3.3.2021 10:43:46 000018 0000013780 0000013770 0000015430 0000000000
3.3.2021 10:44:56 000019 0000013783 0000014686 0000018223 0000000000
3.3.2021 10:46:05 000021 0000012524 0000013791 0000015274 0000000000
3.3.2021 10:47:15 000024 0000013348 0000013778 0000017113 0000000000
3.3.2021 10:48:25 000025 0000013077 0000013614 0000015082 0000000000
3.3.2021 10:49:34 000026 0000013582 0000013357 0000014281 0000000000
3.3.2021 10:50:44 000027 0000012967 0000012748 0000018673 0000000000
3.3.2021 10:51:53 000028 0000013265 0000013582 0000014444 0000000000
3.3.2021 10:53:03 000029 0000014370 0000015041 0000014737 0000000000
3.3.2021 10:54:13 000060 0000013681 0000014372 0000013467 0000000000
3.3.2021 10:55:22 000061 0000013369 0000013583 0000015357 0000000000
3.3.2021 10:56:32 000062 0000013824 0000013820 0000020418 0000000000
3.3.2021 10:57:42 000063 0000013934 0000014472 0000015940 0000000000
3.3.2021 10:58:51 000064 0000013456 0000013901 0000015831 0000000000
3.3.2021 11:00:01 000066 0000013838 0000013539 0000014121 0000000000
3.3.2021 11:01:10 000067 0000013313 0000013805 0000014744 0000000000
3.3.2021 11:02:20 000068 0000014429 0000015842 0000015265 0000000000

```

Vysvětlivky:

1. sloupec- datum měření, 2. sloupec- čas měření, 3. sloupec- číslo TLD, 4., 5., 6. a 7. sloupec - odezva O_i 1., 2., 3. a 4. elementu.

| | | |
|--|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 22 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |


Tab. 6: Specifikace výstupních souborů dle oblasti monitorování v rámci RMS

| Název | Oblast působnosti |
|-------------------------|---------------------------------|
| suorok_čtvrtletí | SÚRO |
| jcrok_čtvrtletí | RC České Budějovice |
| zcrok_čtvrtletí | RC Plzeň |
| scrok_čtvrtletí | RC Ústí nad Labem |
| vcrok_čtvrtletí | RC Hradec Králové |
| jmrok_čtvrtletí | RC Brno |
| smrok_čtvrtletí | SÚRO/RC Ostrava |
| edurok_čtvrtletí | RC Brno – okolí EDU |
| eterok_čtvrtletí | RC České Budějovice – okolí ETE |

Následné zpracování naměřených dat probíhá pomocí aplikace TLD-RMS (webová aplikace), která umožňuje výpočet průměrných dávkových příkonů v MM dle kapitoly 3.5. v souladu s uživatelskou příručkou [10] uloženou na společném disku **SURO fileserver (ironload):tld (S:)** v souboru: **S:\OD\Manuály\TLD_RMS_Envinet\SW590VER117_Manual.doc**. Výsledná data jsou uchovávána prostřednictvím TLD-RMS, případně jsou zákazníkovi předávána ve formě protokolu, jehož vzor zobrazuje obr. 8.

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 23 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

Obr. 8: Vzor protokolu

| | | |
|---|---|-----------------------|
|  | Státní ústav radiační ochrany, v. v. i. Odbor dozimetrie Bartoškova 28, 140 00 Praha 4 | |
| | Protokol SÚRO M4/číslo/datum | |
| Stanovení H*(10) | | |
| Měření a vyhodnocení provedl/a | Uvést jméno a příjmení pracovníka | |
| Přijetí dozimetrů dne | Uvést datum | |
| Měření provedeno dne | Uvést datum | |
| Protokol vyhotoven dne | Uvést datum | |
| Zákazník | Uvést jméno a adresu zákazníka | |
| Specifikace měření | Popsat umístění dozimetrů | |
| Příslušná metodika | Metodika M4 | |
| Přístroje a pomůcky | TLD systém Rados | |
| Období monitorování (od – do) | Uvést data | |
| Měřící místo | H*(10) (mSv) | Ĥ*(10) (nSv/h) |
| Uvést označení měřícího místa | Uvést hodnotu | Uvést hodnotu |
| | | |
| | | |
| U (%) maximální rozšířená nejistota měření pro koeficient rozšíření k = 2 (pravděpodobnost pokrytí 95%) | 36 | |
| Poznámky a vysvětlivky | H*(10) – prostorový dávkový ekvivalent Ĥ*(10) – vypočtený průměrný příkon prostorového dávkového ekvivalentu pro uvedené období | |

Ing. Daniela Ekendahl
vedoucí Odboru dozimetrie

Datum:

Podpis:

| | | |
|--|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 24 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

PŘÍLOHA 4: CELKOVÁ NEJISTOTA STANOVENÍ H*(10) PRO DOZIMETR MM

Uvedené modelové situace vychází z praktických aspektů provozu TLD sítě uvedených v [11].

Tvar funkce y pro stanovení standardní nejistoty odhadu výstupní veličiny $u(y)$:

a) **pro pracoviště s měřicí technikou (SÚRO – ML)**

$$y = x_1 - x_2 - x_3$$

kde x_1 je celková hodnota H*(10) naměřená na dozimetru z MM vyjádřená v μSv , x_2 je hodnota H*(10) v ML za dobu pobytu dozimetru v ML vyjádřená v μSv , x_3 je hodnota H*(10) vztahující se k cestě autem do/z MM v μSv

Pro $u(y)$ platí dle [14]: $u^2(y) = \sum c_i^2 u^2(x_i)$

kde $u(x_i)$ jsou nejistoty odhadů jednotlivých vstupních veličin, c_i jsou koeficienty citlivosti, $c_i = \delta y / \delta x_i$. Veličiny x_1 a x_2 nejsou korelované.

b) **pro pracoviště bez měřicí techniky (RC SÚJB/SÚRO – LS, MS)**

$$y = x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5$$

kde x_1 je celková hodnota H*(10) naměřená na dozimetru z MM vyjádřená v μSv , x_2 je hodnota H*(10) v ML za dobu pobytu dozimetru v ML vyjádřená v μSv , x_3 je hodnota H*(10) odpovídající cestě do/z RC vyjádřená v μSv , x_4 je hodnota H*(10) odpovídající pobytu v RC, x_5 je hodnota H*(10) vztahující se k cestě autem do/z MM v μSv

V případě zjednodušeného režimu za havarijní radiační situace lze pro oba typy pracovišť vyjít z rovnice a). V tom případě x_4 je odhadnutý příspěvek v μSv pro dávky mimo MM a ML stanovený na základě měření při transportech (cesta z ML do MM a zpět) a využití dalších informací v rámci RMS.

Pro $u(y)$ platí: $u^2(y) = \sum c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum \sum \text{cov}(x_i, x_k)$,

kde $u(x_i)$ jsou nejistoty odhadů jednotlivých vstupních veličin, c_i jsou koeficienty citlivosti, $\text{cov}(x_i, x_k)$ je kovariance vztahující se k odhadům korelovaných vstupních veličin x_i a x_k [14].

Rozšířená nejistota měření U je pro 95% interval spolehlivosti je dána vztahem: $U = 2 \cdot u(y)$

Výsledek měření pak může být vyjádřen jako $Y = y \pm U$.

| | | |
|--|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 25 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

V tabulkách 7 a 8 je uveden modelový výpočet U pro **normální radiční situaci** včetně vstupních dat. V tabulce 7 jsou uvedena reálná data z provozu TLD sítě pro funkci a). Tabulka 8 obsahuje reálná data z provozu TLD sítě pro funkci b).

Tab. 7: Pracoviště s měřicí technikou, reálná data (x_i) ze systému Rados za normální radiční situace a vypočtené parametry

| i | x_i | c_i | $u(x_i)$ | $c_i^2 u^2(x_i)$ |
|------------------------|----------------------------|-------|----------|------------------|
| 1 | 300 | 1 | 9 | 81 |
| 2 | 15 | 1 | 0.45 | 0.2 |
| 3 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| $\sum c_i^2 u^2(x_i)$ | 82.2 | | | |
| $u(y)$ | 9.07 | | | |
| U (k=2) | 18.13 | | | |
| y (μSv) | 285 | | | |
| U (%) | 6 | | | |
| $Y = y \pm U$ | 285 $\mu\text{Sv} \pm 6\%$ | | | |

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 26 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

Tab. 8: Pracoviště bez měřicí techniky, reálná data (x_i) ze systému Rados za normální radiční situace a vypočtené parametry

| i | x_i | c_i | $u(x_i)$ | $c_i^2 u^2(x_i)$ |
|-----------------------------|-----------------------|-------|----------|------------------|
| 1 | 300 | 1 | 9 | 81 |
| 2 | 15 | 1 | 0.45 | 0.2 |
| 3 | 12 | 1 | 3.36 | 11.29 |
| 4 | 23 | 1 | 6.9 | 47.61 |
| 5 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| $\sum c_i^2 u^2(x_i)$ | 141.1 | | | |
| $2\sum\sum cov(x_i, x_k)^*$ | -0.98 | | | |
| $u(y)$ | 11.84 | | | |
| $U (k=2)$ | 23.67 | | | |
| $y (\mu Sv)$ | 250 | | | |
| $U (\%)$ | 10 | | | |
| $Y = y \pm U$ | 250 $\mu Sv \pm 10\%$ | | | |

*) x_3 a x_4 jsou korelované

V tabulce 9 je uveden modelový výpočet pro **havarijní (mimořádnou) radiční situaci** za zjednodušených předpokladů a zkráceného monitorovacího období (2 týdny). Je předpokládána situace s příkony v řádu desítek $\mu Sv/h$ v MM i při transportech.

| | | |
|---|-------------------------------------|--|
| Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. | Metodika M4 | List: 27 ze 27 |
| | Stanovení H*(10) TLD systémem Rados | Datum účinnosti: Za správnost: Ing. D. Ekendahl |

Tab. 9: Modelová data (x_i) ze systému Rados pro havarijní radiační situaci a vypočtené parametry

| i | x_i | c_i | $u(x_i)$ | $c_i^2 u^2(x_i)$ |
|--------------------------------------|------------------------------|-------|----------|------------------|
| 1 | 4200 | 1 | 756 | 571536 |
| 2 | 2 | 1 | 0.06 | 0.004 |
| 3 | 70 | 1 | 16.8 | 282.24 |
| $\sum c_i^2 u^2(x_i)$ | 571818.24 | | | |
| $u(y)$ | 756.19 | | | |
| U (k=2) | 1512.37 | | | |
| y (μSv) | 4128 | | | |
| U (%) | 37 | | | |
| Y = y \pm U | 4128 $\mu\text{Sv} \pm 37\%$ | | | |