



Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.

Odbor dozimetrie

Bartoškova 28, 140 00 Praha 4

Metodika M24

Schválená metodika

**Soubor postupů pro stanovení dávky nebo
dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci
komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce**

Vypracoval

Funkce	Jméno	Datum	Podpis
Vedoucí odboru dozimetrie	Ing. Daniela Ekendahl	5.1.2022	

Přezkoumal a schválil

Funkce	Jméno	Datum	Podpis
Náměstek pro RO		5.1.2022	
Archivní označení	SÚRO 262-M24-0	Číslo revize	0
Výtisk číslo	1	Datum účinnosti	1.7.2022

Rozdělovník

Výtisk	Převzal	Datum	Podpis
č. 1	Síťový disk S:\Certifikované metodiky\ M24.pdf Ing. Daniela Ekendahl		
č. 2			
č. 3			

Vypracováno v rámci projektu VI20192022139
Bezpečnostního výzkumu:

**Retrospektivní dozimetrie pro incidenty se
ztracenými zdroji záření**

Rok uplatnění

2022

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 3 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Obsah

1. CÍL METODIKY	4
2. DOZIMETRICKÉ VELIČINY	5
2.1. Kerma	5
2.2. Absorbovaná dávka	5
2.3. Dávkový ekvivalent	5
2.4. Aktivita	6
3. POSTUPY V RÁMCI KOMPLEXNÍ REKONSTRUKCE DÁVKY	7
3.1. Stanovení dávkového příkonu v okolí zdroje záření, identifikace zdroje včetně odhadu jeho aktivity, odběr vzorků pro retrospektivní dozimetrii a záznam geometrie prostředí	7
3.2. Laboratorní stanovení aktivity zdroje záření	8
3.3. Stanovení integrální dávky metodami luminiscenční retrospektivní dozimetrie	8
3.4. Stanovení integrální dávky z přírodního radiačního pozadí	9
3.5. Kontrolní měření dávkového příkonu při laboratorní rekonstrukci expozičních podmínek	10
3.6. Výpočty prostorové distribuce dávkového příkonu na základě simulace expozičních podmínek metodou Monte Carlo	11
3.7. Interpretace naměřených dat a převody mezi veličinami	11
3.8. Verifikace a zabezpečení jakosti	12
3.9. Záznamy nebo výstupní dokumentace	13
4. UPLATNĚNÍ METODIKY A NOVOST POSTUPŮ	14
5. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY	15
6. SEZNAM VÝSTUPŮ A PUBLIKACÍ PŘEDCHÁZEJÍCÍCH METODICE	16
7. PŘÍLOHY	18
Příloha 1: Přístroje používané mobilními skupinami	19
Příloha 2: Výpočetní tabulky, konverzní koeficienty a vztahy pro stanovení dávky z přírodního radiačního pozadí	22
Příloha 3: Termoluminiscenční detektory pro měření v cihlách a podobných materiálech	25
Příloha 4: Hloubková dávková křivka v cihle pro externí zdroj záření ¹³⁷ Cs.....	27
Příloha 5: Vypočtené hodnoty hmotnostních součinitelů absorpce energie	28

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 4 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

1. CÍL METODIKY

Cílem této metodiky je podat souhrn navazujících praktických postupů využitelných pro účely komplexní retrospektivní rekonstrukce dávky prováděné ve vztahu k nálezům nekontrolovaných zdrojů záření spojených se složitějšími expozičními podmínkami.

Výše uvedený cíl vychází z této motivace a předpokladů:

Při událostech spojených s nálezem nekontrolovaných zdrojů záření může být třeba odhadnout dávky osob, které v okolí zdroje pobývaly. V případě složitějších expozičních situací to může vyžadovat aplikaci kombinace různých dozimetrických metod a postupů. Není-li známo, jak dlouho se zdroj záření na místě vyskytoval, nepostačuje pro rekonstrukci dávky pouhé zmapování dávkového příkonu a jeho distribuce v okolí nálezu měření na místě. V těchto případech může být třeba stanovit i integrální dávku pomocí metod retrospektivní dozimetrie. Vyhodnocení situací se složitějšími expozičními a geometrickými podmínkami navíc může vyžadovat i provedení laboratorní rekonstrukce zahrnující jak fyzikální tak i výpočetní metody pro účely návaznosti a interpretace naměřených dat (ICRU, 2019; ICRU, 2002).

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 5 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

2. DOZIMETRICKÉ VELIČINY

V rámci této metodiky jsou používány následující dozimetrické veličiny [ČSN, 2013] :

2.1. KERMA

Kerma **K** je podíl součtu počátečních kinetických energií dE_k všech nabitých částic, uvolněných nenabitými ionizujícími částicemi v uvažované látce, a hmotnosti dm této látky,

$$K = \frac{dE_k}{dm}$$

Jednotkou kermy v soustavě SI je $J \cdot kg^{-1}$ a její zvláštní název je gray (Gy).

2.2. ABSORBOVANÁ DÁVKA

Absorbovaná dávka, D je definována jako podíl $d\bar{\epsilon}$ a dm , kde $d\bar{\epsilon}$ je střední energie ionizujícího záření sdělená látce o hmotnosti dm , tj.

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

Jednotkou absorbované dávky je gray (Gy).

2.3. DÁVKOVÝ EKVIVALENT

Veličina **dávkový ekvivalent, H** je definována vztahem

$$H = QD$$

kde D je absorbovaná dávka v bodě zájmu ve tkáni a Q je odpovídající jakostní faktor v tomto bodě, jehož hodnota je určena typem a energií nabitých částic procházejících objemovým elementem tkáně zahrnujícím tento bod. Q je funkcí lineárního přenosu energie nabitých částic ve vodě. Pro fotonové záření je hodnota Q rovna 1. Jednotkou dávkového ekvivalentu v soustavě SI je $J \cdot kg^{-1}$ a její zvláštní název je sievert (Sv).

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 6 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Osobní dávkový ekvivalent, $H_p(d)$, je dávkový ekvivalent v ICRU (měkké) tkáni v hloubce d pod konkrétním bodem povrchu lidského těla. Tento bod je obvykle volen v místě měření. Pro pronikavé fotonové záření se používá hloubka 10 mm. Jednotkou osobního dávkového ekvivalentu je Sv. Vztahy mezi základní fyzikální veličinou kermou ve vzduchu, K_a , a $H_p(10)$ jsou uvedeny v publikaci ICRP 74 [ICRP, 1997]. Veličina $H_p(10)$ poskytuje odhad efektivní dávky.

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. Vztahy mezi K_a a $H^*(10)$ jsou uvedeny v publikaci ICRP 74 [ICRP, 1997]. Veličina $H^*(10)$ poskytuje odhad efektivní dávky.

2.4. AKTIVITA

Aktivita, A , je obecně definována jako podíl středního počtu radioaktivních přeměn dN v určitém množství radionuklidu za časový interval dt a tohoto časového intervalu, tj.

$$A = \frac{dN}{dt}$$

Jednotkou aktivity v soustavě SI je s^{-1} a její zvláštní název je becquerel [Bq].

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 7 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

3. POSTUPY V RÁMCI KOMPLEXNÍ REKONSTRUKCE DÁVKY

Komplexní retrospektivní rekonstrukce dávky v souvislosti mimořádnými radiačními událostmi spojenými zejména s nálezy nekontrolovaných zdrojů záření v prostoru, kde neprobíhalo kontinuální monitorování dávek v prostředí ani osobních dávek, může vyžadovat kombinaci využití různých postupů a metod:

1. Lokalizaci a identifikaci zdroje záření včetně odhadu jeho aktivity, měření dávkového příkonu v okolí nálezu zdroje záření spojené s odběrem vzorků pro retrospektivní dozimetrii.
2. Laboratorní stanovení aktivity nalezeného zdroje záření
3. Stanovení integrální dávky metodami luminiscenční retrospektivní dozimetrie
4. Stanovení dávky z přírodního radiačního pozadí
5. Kontrolní stanovení dávkového příkonu při laboratorní rekonstrukci expozičních podmínek
6. Výpočty prostorové distribuce dávkového příkonu na základě simulace expozičních podmínek metodou Monte Carlo
7. Interpretaci dat získaných z výše uvedených měření.

3.1. STANOVENÍ DÁVKOVÉHO PŘÍKONU V OKOLÍ ZDROJE ZÁŘENÍ, IDENTIFIKACE ZDROJE VČETNĚ ODHADU JEHO AKTIVITY, ODBĚR VZORKŮ PRO RETROSPEKTIVNÍ DOZIMETRII A ZÁZNAM GEOMETRIE PROSTŘEDÍ

Lokalizaci nekontrolovaného zdroje záření včetně měření v okolí zdroje zajišťují mobilní skupiny. Jedná se o měření příkonu prostorového dávkového ekvivalentu, zejména v místech pobytu osob a v těsné blízkosti následně odebraných vzorků pro laboratorní retrospektivní rekonstrukci dávky, identifikaci zdroje záření a odhad jeho aktivity. Tyto procedury se provádí dle příslušných postupů popsanych v **Metodice detekce radioaktivních látek na zasaženém území – Činnost mobilních skupin při monitorování radiační havárie** [Češpírová, 2019]. Detektory používané pro tato měření včetně jejich základních dozimetrických vlastností podstatných pro účely interpretace dat jsou uvedeny v **Příloze 1**.

Předměty odebrané mobilními skupinami pro retrospektivní dozimetrii jsou vzorky okolního prostředí použitelné pro retrospektivní luminiscenční dozimetrii (viz dále část 3.3.). Kromě toho mohou být odebrány i předměty charakteru osobních předmětů použitelných pro retrospektivní dozimetrii, jsou-li dané situaci relevantní a získatelné (osobní předměty ozářených osob uvedené v části 3.3.).

Důležitou součástí činnosti mobilní skupiny na místě je **pořízení náčrtu a fotodokumentace místa nálezu** a okolí zdroje s vyznačením míst provedených měření a odběrů vzorků.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 8 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

3.2. LABORATORNÍ STANOVENÍ AKTIVITY ZDROJE ZÁŘENÍ

V případě situací, kdy je lokalizován zdroj záření vhodný pro převoz do laboratoří SÚRO a zároveň okolnosti incidentu (nehody) vyžadují laboratorní rekonstrukci expoziční situace, je třeba co nejpřesněji stanovit aktivitu zdroje záření. Údaj o aktivitě zdroje je důležitým podkladem zejména pro možnost výpočtů dávkového příkonu v místech zájmu.

Stanovení aktivity zdroje se provádí dle akreditované metodiky **Stanovení radionuklidů spektrometrií gama záření s vysokým rozlišením** [Dragounová a Žlebčík, 2020].

3.3. STANOVENÍ INTEGRÁLNÍ DÁVKY METODAMI LUMINISCENČNÍ RETROSPEKTIVNÍ DOZIMETRIE

Vhodnými materiály prostředí využitelnými pro stanovení integrální dávky na základě měření opticky stimulované luminiscence (OSL) jsou pálené keramické materiály, které obsahují křemen (zejména cihly, porcelán, sanitární keramika, apod.) nebo běžná sůl (NaCl).

V situacích, kdy se v okolí zdroje záření nacházely osoby, u kterých nelze vyloučit významné ozáření dávkou nad 0.1 Gy, lze k odhadu této dávky využít osobní předměty těchto osob jako mobilní telefony a běžné čipové karty, které obsahují radiačně citlivé materiály vykazující po ozáření OSL nebo TL. Tyto předměty mohou být zajištěny buď přímo mobilními skupinami, je-li to možné, nebo dodatečně na základě šetření.

Stanovení integrální dávky se provádí podle příslušných metodik. Přehled metodik pro stanovení integrální dávky metodami luminiscenční dozimetrie spolu se základními charakteristikami těchto měření je uveden v tabulce 1.

V případě použití pálených keramických materiálů odebraných v prostředí pro účely rekonstrukce dávky na základě měření OSL křemene extrahovaného z těchto materiálů platí, že dávka vztahující se k mimořádné radiační události, D , je dána jako rozdíl celkové dávky naměřené v křemenu, D_t , a dávky v křemenu vztahující se k přírodnímu radiačnímu pozadí, D_n .

$$D = D_t - D_n$$

Dávka D_t se stanovuje pomocí metodiky M23 [Ekendahl, 2021c]. Postup pro stanovení dávky D_n následuje v části 3.4.

V případě použití běžné soli nebo materiálů z předmětů charakteru osobních potřeb lze příspěvek od dávky z přírodního pozadí zanedbat, protože tyto materiály jsou obvykle staré maximálně několik málo let a dávka z přírodního radiačního pozadí je zanedbatelná ve srovnání s minimální detekovatelnou dávkou (MDD).

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 9 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Tabulka 1. Přehled metodik luminiscenční retrospektivní dozimetrie

Odebraný vzorek nebo osobní předmět	Materiál pro měření luminiscence	Označení metodiky	Název metodiky [odkaz]
Pálená cihla, porcelán, sanitární keramika, apod.	křemen	M23	Retrospektivní dozimetrie - Stanovení dávky z křemene metodou opticky stimulované luminiscence [Ekendahl, 2021c]
Sůl (NaCl)	NaCl	M8	Stanovení dávky z externího ozáření na základě OSL běžné soli [Ekendahl, 2016]
Mobilní telefon	Čipový rezistor s Al ₂ O ₃ :C	M7	Retrospektivní dozimetrie - Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al ₂ O ₃ :C z mobilního telefonu [Ekendahl, 2014]
	Sklo z displeje	M22	Retrospektivní dozimetrie - Odhad osobní dávky s využitím skla extrahovaného z mobilního telefonu [Ekendahl, 2020]
Čipová karta	Čipový modul	M21	Retrospektivní dozimetrie - Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu [Ekendahl, 2020]

3.4. STANOVENÍ INTEGRÁLNÍ DÁVKY Z PŘÍRODNÍHO RADIAČNÍHO POZADÍ

Dávka v pálených cihlách z přírodního radiačního pozadí, D_n , závisí na čase uplynulém od vypálení, t , na obsahu přírodních radionuklidů, které vedou k ozáření s příkonem dávek ze záření \dot{D}_α , \dot{D}_β a \dot{D}_γ , a na expozici kosmickému záření s dávkovým příkonem \dot{D}_c :

$$D_n = t \cdot (\dot{D}_\alpha + \dot{D}_\beta + \dot{D}_\gamma + \dot{D}_c)$$

Dávku ze záření α v křemenu lze zanedbat z důvodu radiochemické přípravy křemene, kdy je působením kyseliny fluorovodíkové odleptána povrchová vrstva ze zrn křemene. Dávky ze záření beta a gama, jehož zdrojem jsou přírodní radionuklidy, jsou závislé na aktivitě těchto radionuklidů [Guérin et al., 2012]. Pro účely výpočtu \dot{D}_β a \dot{D}_γ je nejprve třeba změřit aktivitu (Bq/kg) těchto radionuklidů: ²³⁸U, ²²⁶Ra, ²³²Th a ⁴⁰K. Měření aktivity se provádí dle metodiky **Stanovení radionuklidů spektrometrií gama záření s vysokým rozlišením** [Dragounová a Žlebčík, 2020]. Aktivity (Bq/kg) dalších přírodních radionuklidů ²³⁴U, ²³⁰Th, ²²²Rn, ²¹⁰Pb a ²²⁰Rn

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 10 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

se dopočítají postupem uvedeným v **Příloze 2**. Příkony \dot{D}_β a \dot{D}_γ se následně stanoví s využitím publikovaných konverzních koeficientů pro jednotlivé radionuklidy [Guérin et al., 2012], které jsou uvedeny v **Příloze 2**. Příkon kosmického záření se stanoví na základě publikovaných dat pro typické hodnoty dávkového příkonu z kosmického záření ve zdi \dot{D}_c [ICRU, 2002] a na základě přepočtu pro nadmořskou výšku [Cinelli et al., 2017]. Příslušné vztahy jsou uvedeny rovněž v **Příloze 2**.

3.5. KONTROLNÍ MĚŘENÍ DÁVKOVÉHO PŘÍKONU PŘI LABORATORNÍ REKONSTRUKCI EXPOZIČNÍCH PODMÍNEK

Je-li potřebné a možné provést rekonstrukci expozičních podmínek v laboratoři, je třeba co nejpřesněji simulovat podmínky z místa nálezu zdroje. Je třeba zajistit správnou polohu zdroje záření v prostředí vůči okolním předmětům v souladu s náčrtem místa nálezu vypracovaným mobilní skupinou (viz část 3.1.). Správné nastavení těchto podmínek je třeba zkontrolovat s využitím stejných monitorů dávkového příkonu, které byly použity k měření v místě nálezu zdroje záření (viz část 3.1.). Případné doplňkové měření dávkového příkonu ve vybraných bodech zájmu je možné provést s využitím těchto monitorů nebo pomocí termoluminiscenčních dozimetrů. Pro účely měření $H^*(10)$ mohou být použity TL dozimetry prostředí dle příslušné akreditované metodiky M2 [Ekendahl, 2021].

Je-li součástí rekonstrukce dávky měření integrální dávky v cihlové zdi, může být třeba kontrolní měření dávkové distribuce ve vybraných bodech ve zdi. Pro tento účel lze využít termoluminiscenční dozimetry (TLD). V případě vysokoenergetického zdroje záření gama jsou nejvhodnějšími termoluminiscenčními detektory $Al_2O_3:C$ nebo $LiF:Mg,Cu,P$. V případě spektra záření gama se střední energií nižší než 200 keV a pro měření ve větších hloubkách (> 5 cm) je nejvhodnějším detektorem $LiF:Mg,Cu,P$ [Ekendahl et al., 2021]. Podrobnosti k těmto detektorům, jejich přípravě a měření jsou uvedeny v **Příloze 3**. Kalibrace těchto TLD se provádí ve veličině K_a . Přepočet na dávku absorbovanou v materiálu zájmu se provádí na základě vztahů mezi hmotnostními součiniteli absorpce energie pro uvažované materiály (viz část 3.7.).

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 11 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

3.6. VÝPOČTY PROSTOROVÉ DISTRIBUCE DÁVKOVÉHO PŘÍKONU NA ZÁKLADĚ SIMULACE EXPOZIČNÍCH PODMÍNEK METODOU MONTE CARLO

Výpočet prostorové distribuce dávky a fotonových spekter v požadovaném materiálu způsobené zdrojem gama záření v požadované geometrii se provádí pomocí simulace metodou Monte Carlo. Lze využít kód FLUKA/Flair jako nástroj pro simulaci transportu částic a interakci s hmotou pokrývajícím širokou oblast aplikací [Bohlen et al., 2014; Ferrari et al., 2005; Vlachoudis, 2009].

Výpočet dávky provedeme s maximální nejistotou $\leq 1\%$ (statistická nejistota typu A) což vyžaduje odpovídající počet historií. V procesu simulace zvolíme volbu PRECISIO [Ferrari et al., 2005] na kartě DEFAULTS, mezní – nejnižší energii nastavíme pro elektrony na hodnotu 10 keV a pro fotony na hodnotu 1 keV pomocí EMFCUT. Zdroj záření definujeme jako radioaktivní izotop, případně načteme známé energetické spektrum pomocí karty SOURCE a uživatelské rutiny source.f. V programu vytvoříme požadovanou geometrii jak zdroje záření, tak oblasti ve které počítáme dávku. Spolu s definicí geometrie také nastavíme pro zvolené oblasti potřebný materiál, například vzduch, nebo jakýkoliv materiál, jehož složení a hustotu lze nalézt v literatuře (například v databázi NIST). Program Flair má ve své knihovně také už uložené definice některých vhodných materiálů. Pro výpočet dávky použijeme kartu USBIN, dávku simulujeme s vhodně zvoleným prostorovým rozlišením. Fotonová spektra simulujeme pomocí karty USBDX. Z 3-D rozložení dávky v programu Flair [Vlachoudis, 2009] vytvoříme požadované 1-D a 2-D projekce dle potřeby.

Příklad vypočtené hloubkové dávkové křivky v cihlové zdi pro zdroj záření ^{137}Cs se střední energií 662 keV je uveden v **Příloze 4**. Vypočtená hloubková dávková křivka je v dobrém souladu s naměřenými hloubkovými dávkovými křivkami pomocí TLD a pomocí křemene extrahovaného z ozářené cihlové zdi [Ekendahl et al., 2021a]. Pro jiné zdroje je třeba vypočítat specifické hloubkové dávkové křivky.

3.7. INTERPRETACE NAMĚŘENÝCH DAT A PŘEVODY MEZI VELIČINAMI

Vzhledem k tomu, že různé detektory vykazují různou energetickou závislost, je základní výchozí informací pro správnou interpretaci naměřených dat znalost spektra záření na základě identifikace zdroje a znalost odezvy detektoru v závislosti na energii záření. Přístroje používané mobilními skupinami (viz **Příloha 1**) mají tendenci podhodnocovat veličinu $\dot{H}^*(10)$ v oblasti nižších energií fotonů než pro zdroj ^{137}Cs , pro který jsou optimalizovány a ověřovány. V případě nálezu zdrojů s nižší energií např. ^{192}Ir nebo ^{241}Am je třeba korigovat naměřený výsledek $\dot{H}^*(10)$ vzhledem k energetické odezvě daného detektoru. Stejně tak je třeba v oblasti nižších energií fotonů korigovat energetickou závislost luminiscenčních detektorů (viz **Příloha 3**). Pokud jsou

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 12 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

TLD použity pro měření dávkové distribuce v cihlách, je třeba vzít v úvahu i modifikaci spektra záření v závislosti na hloubce v cihlové zdi. Spektrum záření v určité hloubce může být vypočteno metodou Monte Carlo [Ekendahl et al., 2021a]. Energetická závislost materiálů pro retrospektivní dozimetrii je uvedena v příslušných metodikách (viz tabulka 1). Vícesložkový TLD pro měření H*(10) nevyžaduje korekci energetické závislosti (viz metodika M2) [Ekendahl, 2021].

Výpočty dávkové distribuce v různých materiálech vyžadují znalost hmotnostního součinitele absorpce energie, μ_{en}/ρ , pro daný materiál. Ten může být spočítán pro konkrétní vícesložkový materiál na základě znalosti hmotnostních součinitelů absorpce energie jednotlivých atomových složek $(\mu_{en}/\rho)_i$ následovně, přičemž w_i je hmotnostní frakce atomu i v uvažovaném materiálu ($\sum_i w_i = 1$).

$$\mu_{en}/\rho = \sum_i w_i \cdot (\mu_{en}/\rho)_i$$

Hodnoty $(\mu_{en}/\rho)_i$ pro různé prvky a vybrané materiály v závislosti na energii záření jsou uvedeny v databázi NIST (<https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>). Vypočtené hmotnostní součinitele absorpce energie pro cihlu, křemen a vzduch v závislosti na energii fotonů jsou uvedeny v **Příloze 5**.

V případě, kdy lze předpokládat rovnováhu nabitých částic v prostředí, platí mezi dávkami D_m a D_n v materiálech m a n následující vztah:

$$\frac{D_m}{D_n} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_n}$$

Pro detektory kalibrované ve veličině kerma ve vzduchu při podmínce použití vhodné build-up vrstvy platí pro dávku ve vzduchu, $D_a = K_a$. Vztahy mezi K_a a operačními veličinami v závislosti na energii záření jsou uvedeny v publikaci ICRP 74 [ICRP, 1997].

3.8. VERIFIKACE A ZABEZPEČENÍ JAKOSTI

Metodika byla ověřena pomocí experimentálních studií, kde byly použity detektory mobilních skupin, pasivní detektory, křemen extrahovaný z cihel a výpočty na bázi metody Monte Carlo, a kde byla prověřena komplementarita celého systému použitých postupů a metod [Ekendahl et al., 2020; Ekendahl et al., 2021a; Ekendahl et al., 2021b]. Některé ze zahrnutých metod a postupů již byly úspěšně aplikovány v rámci reálné rekonstrukce dávky v souvislosti s nálezem radiové jehly [Ekendahl et al., 2018].

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 13 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Jakost měření je zabezpečena pravidelným ověřením relevantních měřících přístrojů a systémů, srovnávacími měřeními, případně realizací experimentů pro účely simulace externí expozice s následným vyhodnocením dávky s využitím jednotlivých postupů.

3.9. ZÁZNAMY NEBO VÝSTUPNÍ DOKUMENTACE

Záznamy vztažené k provedení komplexní dozimetrické rekonstrukce jsou uchovávány v těchto formách:

- Záznamy z místa nálezu zdroje (popis místa, náčrt místa nálezu včetně záznamu pozice zdroje, míst měření a odebraných vzorků, fotodokumentace) v deníku mobilní skupiny
- Písemné záznamy z měření
- Elektronické záznamy z měření
- Deníky měření použitých přístrojů a systémů
- Výpočetní záznamy
- Výstupy z jednotlivých použitých metodik (protokoly)

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 14 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

4. UPLATNĚNÍ METODIKY A NOVOST POSTUPŮ

Tato metodika byla vytvořena pro účely doplnění systému metod havarijní připravenosti, které Státní ústav radiační ochrany (SÚRO) poskytuje pro potřeby Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Systém těchto metod je vypracován a implementován v souladu s příslušnými mezinárodními doporučeními vydanými Mezinárodní komisí pro radiologické jednotky a měření (ICRU, 2019; ICRU, 2002). Metodika je určena především pro složité expoziční situace spojené s nálezy nekontrolovaných zdrojů záření, kdy komplexní retrospektivní rekonstrukce dávky vyžaduje aplikaci kombinace různých metod měření distribuce dávkového příkonu, měření integrální dávky, výpočty a simulace. Tato metodika je prvním uceleným dokumentem propojujícím jak již existující (viz části 3.1., 3.2., 3.3. a 3.5.), tak i nové metody a postupy (viz části 3.4., 3.6. a 3.7.).

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 15 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

5. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

ČSN, 2013. ČSN EN ISO 80000-10. Veličiny a jednotky. Část 10: Atomová a jaderná fyzika.

Cinelli, G. et al., 2017. European annual cosmic-ray dose: estimation of population exposure. Journal of Maps. Vol. 13, No. 2, 812 - 821

Guérin, G. et al., 2012. On the use of the infinite matrix assumption and associated concepts: A critical review. Radiat. Meas. 47, 778 – 785.

ICRP, 1997. Publication 74. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. Ann. ICRP. 26(3/4)

ICRU, 2002. Retrospective assessment of exposures to ionising radiation. ICRU Report 68. Nuclear Technology Publishing, Ashford.

ICRU, 2019. Methods for initial-phase assessment of individual doses following acute exposure to ionizing radiation. ICRU Report 94. SAGE Publishing, London.

NIST. NIST Standard Reference Database 126. <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 16 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

6. SEZNAM VÝSTUPŮ A PUBLIKACÍ PŘEDCHÁZEJÍCÍCH METODICE

Čemusová, Z., 2021. Metodika M4. Stanovení $H^*(10)$ TLD systémem Rados. SÚRO 262-M4-x, aktuální znění. Odbor dozimetrie, Státní ústav radiační ochrany.

Češpírová, I., 2015. Metodika detekce radioaktivních látek na zasaženém území – Činnost mobilních skupin při monitorování radiační havárie. Aktuální znění. Státní ústav radiační ochrany. Dostupné na <https://www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/certifikovane-metodiky>

Dragounová, L., Žlebčík, P., 2020. Standardní zkušební postup SZP 11. Stanovení radionuklidů spektrometrií záření gama s vysokým rozlišením SÚRO SZP_11_G_revXX. Oddělení spektrometrie, Státní ústav radiační ochrany.

Ekendahl, D., 2014. Metodika M7. Retrospektivní dozimetrie – Odhad osobní dávky s využitím vzorků Al_2O_3 z mobilního telefonu. SÚRO 141-18.9-x, aktuální znění. Oddělení dozimetrie, Státní ústav radiační ochrany. Dostupné na <https://www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/certifikovane-metodiky>

Ekendahl, D., 2016. Metodika M8. Stanovení dávky z externího ozáření na základě OSL běžné soli (NaCl). SÚRO 261-M8-x, aktuální znění. Oddělení dozimetrie, Státní ústav radiační ochrany. Dostupné na <https://www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/certifikovane-metodiky>

Ekendahl, D. et al., 2018. Retrospective dose reconstruction for an incident involving a concealed radium needle. Radiat. Meas. 119, 27-32

Ekendahl, D. et al., 2019. Analýza zkušeností z dosavadních nálezů ztracených zdrojů záření. Zpráva SÚRO č. 16/2019. Praha: SÚRO, 2019

Ekendahl, D. et al., 2020. Experimenty s pasivními i aktivními detektory. Zpráva SÚRO č. 31/2020. Praha: SÚRO, 2020

Ekendahl, D., 2021. Metodika M2. Stanovení $H^*(10)$ a $H'(0.07)$ systémem TLD Harshaw 6600. SÚRO M_260-2_ENV-revxx, aktuální znění. Odbor dozimetrie, Státní ústav radiační ochrany.

Ekendahl, D. et al., 2021a. Comparison of luminescence detectors of $Al_2O_3:C$, $CaF_2:Mn$, $LiF:Mg,Cu,P$ and quartz with respect to retrospective dose reconstructions using bricks. Appl. Radiat. Isot. 178, 109947

Ekendahl, D. et al., 2021b. Experimenty pro účely komplexní rekonstrukce dávky. Zpráva SÚRO č. 2/2021. Praha: SÚRO, 2021.

Ekendahl, D., 2021c. Metodika M23. Retrospektivní dozimetrie - Stanovení dávky z křemene metodou opticky stimulované luminescence. SÚRO 262-M23-x, aktuální znění. Oddělení dozimetrie, Státní ústav radiační ochrany. Dostupné na <https://www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/certifikovane-metodiky>

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 17 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Ekendahl, D. et al., 2021d. Studium odezvy dozimetrů prostředí pro účely možnosti implementace nových operačních veličin. Zpráva SÚRO č. 6/2021. Praha: SÚRO, 2021.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 18 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

7. PŘÍLOHY

Seznam příloh

- Příloha 1: Přístroje používané mobilními skupinami
- Příloha 2: Výpočetní tabulky, konverzní koeficienty a vztahy pro stanovení dávky z přírodního radiačního pozadí
- Příloha 3: Termoluminiscenční dozimetry pro měření v cihlách a podobných materiálech použitých pro extrakci křemene
- Příloha 4: Hloubková dávková křivka v cihle pro externí zdroj záření ^{137}Cs
- Příloha 5: Vypočtené hodnoty hmotnostních součinitelů absorpce energie

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 19 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 1: PŘÍSTROJE POUŽÍVANÉ MOBILNÍMI SKUPINAMI

Exploranium GR-135 Plus Identifier



Obr. 1. Přístroj Exploranium GR-135 Plus Identifier

Přístroj (viz obr. 1) je určen pro radiační průzkum, měření $H^*(10)$, resp. příkonu $H^*(10)$, a pro spektrometrickou identifikaci radionuklidů (za použití zabudovaných knihoven). Kalibrace přístroje je provedena ve veličině příkonu kermy ve vzduchu. Přístroj obsahuje scintilační krystal NaI(Tl) o objemu 65 cm^3 ($\varnothing 38 \text{ mm} \times 57 \text{ mm}$ nebo $\varnothing 1,5'' \times 2,2''$) pro měření v oblasti nízkých příkonů dávky a energeticky kompenzovanou Geiger-Müllerovu trubici pro měření PPDE nad 1 mSv/h , příp. CZT detektor nebo detektor pro neutrony. Energetická rozlišovací schopnost je $< 9 \%$ FWHM pro 662 keV (^{137}Cs). Měřicí rozsah přístroje je od $0,01 \mu\text{Sv/h}$ do 100 mSv/h . Energetický rozsah je od 50 keV do 3 MeV . Provozní teploty měřidla leží v intervalu od -10°C do $+50^\circ\text{C}$. Střed krystalu NaI(Tl) se nachází 48 mm od středu čela detektoru (označen červenou tečkou). Při ozáření detektoru kolimovaným svazkem ^{137}Cs z bočních úhlu a zespodu (osa rotace je kolmá na střed čela detektoru a prochází rovnoběžně s nejdelší stranou detektoru), změny (kladné) v odezvě jsou v rozmezí $1\text{--}11 \%$ pro úhly rotace $-75^\circ - +75^\circ$. V případě ozáření detektoru pod úhly $-75^\circ - +75^\circ$ pouze zespodu, narůstá odezva maximálně o 4% a klesá nejvíce o 35% . Přístroj vykazuje výraznou závislost odezvy na energii záření (viz obr. 3), kterou je třeba brát v potaz při interpretaci výsledků.

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 20 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

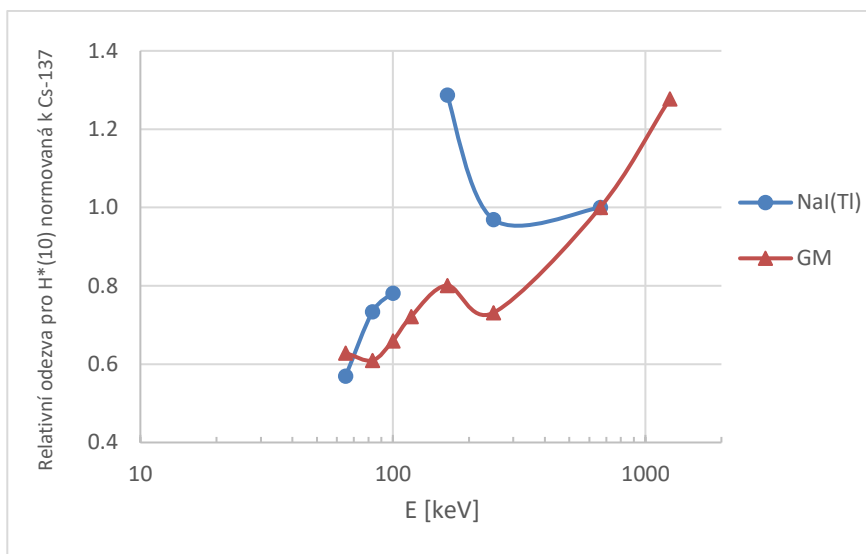
Georadis RT-30 Super-Ident



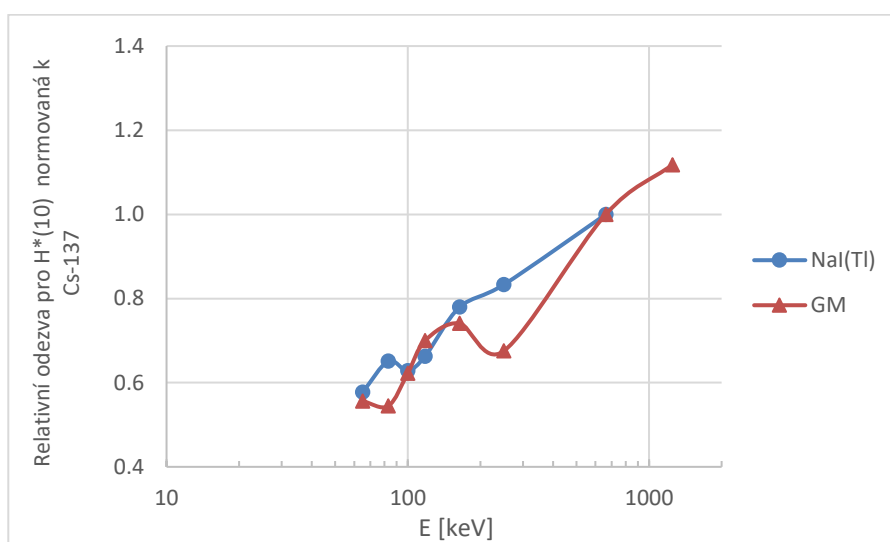
Obr. 2. Přístroj Georadis RT-30 Super-Ident

Přístroj (viz obr. 2) lze použít pro radiční průzkum (včetně nahrávání GPS souřadnic), měření $H^*(10)$, resp. jeho příkonu, a také pro spektrometrickou identifikaci radionuklidů (pomocí vestavěných knihoven). Přístroj je primárně kalibrován ve veličině příkon kermy ve vzduchu. Součástí přístroje je scintilační krystal NaI(Tl) o objemu 104 cm^3 ($\varnothing 51 \text{ mm} \times 51 \text{ mm}$, nebo $\varnothing 2'' \times 2''$). Přístroj dále obsahuje energeticky kompenzovanou Geiger-Müllerovu trubici nebo (dle modifikace) detektor neutronů na bázi ^3He . Energetická rozlišovací schopnost je $< 7 \%$ FWHM pro 662 keV a ^{137}Cs . Měřicí rozsah přístroje leží v intervalu od $0,01 \mu\text{Sv/h}$ do 10 mSv/h . Energetický rozsah detektoru je 20 keV – 3 MeV. Provozní teploty přístroje jsou v rozmezí od -10°C do $+50^\circ\text{C}$. Střed krystalu NaI(Tl) leží v hloubce 40 mm od čela detektoru a ve výšce 40 mm od spodní strany přístroje. Kalibrační bod detektoru leží uprostřed spodní strany ve vzdálenosti 100 mm od čela detektoru. Při ozáření detektoru z bočních stran a pod úhly $-75^\circ - +75^\circ$ (osa rotace prochází kolmo seshora na kalibrační bod), leží změny odezvy detektoru v intervalu od -36% do $+4 \%$. V případě ozáření detektoru zespoda a pod úhly $-75^\circ - +75^\circ$ (osa rotace prochází přes kalibrační bod a kolmo na boční strany detektoru), jsou změny v odezvách detektoru v intervalu od -37% do $+5 \%$. Při ozáření detektoru zespoda a z bočních stran pod úhly $-75^\circ - +75^\circ$ (osa rotace je souběžná s nejdelsí stranou detektoru), klesala odezva nejvíce o 2% a narůstala maximálně o 5% . Přístroj vykazuje výraznou závislost odezvy na energii záření (viz obr. 4), kterou je třeba brát v potaz při interpretaci výsledků.

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 21 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl



Obr. 3. Energetická závislost přístroje Exploranium GR-135 Plus Identifier (data v rozmezí energií 100 – 200 keV chybí z důvodu nemožnosti dosažení provozní hodnoty dávkového příkonu pro detektor NaI(Tl) v kalibrační laboratoři) [Ekendahl et al., 2021d]



Obr. 4. Energetická závislost přístroje Georadis RT-30 Super-Ident [Ekendahl et al., 2021d]

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 22 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 2: VÝPOČETNÍ TABULKY, KONVERZNÍ KOEFICIENTY A VZTAHY PRO STANOVENÍ DÁVKY Z PŘÍRODNÍHO RADIAČNÍHO POZADÍ

Stanovení příkonů dávek \dot{D}_β a \dot{D}_γ z přírodních radionuklidů [Guérin et al., 2012]

Tabulka 2 slouží pro záznam a výpočet aktivit a příslušných nejistot uvedených radionuklidů. Aktivity ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th a ^{40}K jsou stanoveny prostřednictvím spektrometrie záření gama a to buď přímo, nebo z aktivit jejich dceřiných produktů. Aktivity ostatních radionuklidů jsou dopočtené na základě uvedených vztahů. Tabulka 3 udává konverzní koeficienty pro jednotlivé radionuklidy pro přepočtení aktivit $A(\text{Bq/kg})$ na dávkové příkony \dot{D}_β a \dot{D}_γ (mGy/rok).

Tabulka 2. Výpočet aktivit $A(\text{Bq/kg})$ a příslušných nejistot $u(\text{Bq/kg})$ pro radionuklidy

Radionuklid	$A (\text{Bq/kg})$	$u (\text{Bq/kg})$
^{238}U	$A(^{238}\text{U})$	$u(^{238}\text{U})$
^{234}U	$A(^{234}\text{U}) = (A(^{238}\text{U}) - A(^{226}\text{Ra}))/2$	$u(^{234}\text{U}) = u(^{238}\text{U})$
^{230}Th	$A(^{230}\text{Th}) = A(^{234}\text{U})$	$u(^{230}\text{Th}) = u(^{234}\text{U})$
^{226}Ra	$A(^{226}\text{Ra})$	$u(^{226}\text{Ra})$
^{222}Rn	$A(^{222}\text{Rn}) = 0.8 * A(^{226}\text{Ra})$	$u(^{222}\text{Rn}) = 0.1 * u(^{226}\text{Ra})$
^{210}Pb	$A(^{210}\text{Pb}) = A(^{222}\text{Rn})$	$u(^{210}\text{Pb}) = u(^{222}\text{Rn})$
^{232}Th	$A(^{232}\text{Th})$	$u(^{232}\text{Th})$
^{220}Rn	$A(^{220}\text{Rn}) = A(^{232}\text{Th})$	$u(^{220}\text{Rn}) = u(^{232}\text{Th})$
^{40}K	$A(^{40}\text{K})$	$u(^{40}\text{K})$

Tabulka 3. Konverzní koeficienty pro jednotlivé radionuklidy pro přepočtení $A(\text{Bq/kg})$ na \dot{D}_β a \dot{D}_γ (mGy/rok) včetně nejistot.

Radionuklid	\dot{D}_β (mGy/rok)	\dot{D}_γ (mGy/rok)	$u(\dot{D}_\beta)$ (mGy/rok)	$u(\dot{D}_\gamma)$ (mGy/rok)
^{238}U	0.004241	0.000124	0.000094	0.000016
^{234}U	0.000064	0.000043	0.000001	0.000001
^{230}Th	0.000347	0.000123	0.000006	0.000001
^{226}Ra	0.000018	0.000036	0.000001	0.000001
^{222}Rn	0.004565	0.008287	0.000059	0.000032
^{210}Pb	0.002041	0.000022	0.000004	0.000002
^{232}Th	0.002322	0.004424	0.000134	0.000028
^{220}Rn	0.004497	0.007390	0.000045	0.000024
^{40}K	0.002523	0.000787	0.000004	0.000014

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 23 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Uvedené nejistoty u představují kombinovanou standardní nejistotu na úrovni 1 sigma.

Pro automatický výpočet hodnot dávkových příkonů \dot{D}_β a \dot{D}_γ (mGy/rok) slouží výpočetní tabulka A ve formě listu aplikace Excel „M24 Calculation.xlsx“, která je k dispozici zde: S:\Certifikované metodiky\M24 (viz obr. 5). Tato výpočetní tabulka propojuje data z tabulek 2 a 3. Příklad výstupu výpočtu na základě reálných měření aktivit ze vzorku pálené cihly je uveden níže.

Výpočetní tabulka A							
M24 Výpočet příkonu \dot{D}_β a \dot{D}_γ z aktivity přírodních radionuklidů							
Guérin, G. Et al., 2012. On the use of the infinite matrix assumption and associated concepts: A critical review. I							
Do podbarvených buněk vložit naměřené aktivity							
Identifikace vzorku	Cihla 3						
Datum měření	28.05.2021						
	Aktivita		Beta	Gamma			
	Bq/kg		mGy/rok	mGy/rok			
U-238	57.60	4.60	0.244	0.020	0.007	0.001	
U-234	56.40	4.60	0.004	0.000	0.002	0.000	
Th-230	56.40	4.60	0.020	0.002	0.007	0.001	
Ra-226	55.20	2.70	0.001	0.000	0.002	0.000	
Rn-222	44.16	5.52	0.202	0.025	0.366	0.046	
Pb-210	44.16	5.52	0.090	0.011	0.001	0.000	
Th-232	62.50	3.50	0.145	0.012	0.277	0.016	
Rn-220	62.50	3.50	0.281	0.016	0.462	0.026	
K-40	560.0	27.0	1.413	0.068	0.441	0.023	
			Σ	2.399	0.079	1.565	0.059
Výsledky							
\dot{D}_β (mGy/rok)	2.399						
\dot{D}_γ (mGy/rok)	1.565						
Součet (mGy/rok)	3.964						

Obr. 5. Tabulka pro automatický výpočet hodnot dávkových příkonů \dot{D}_β a \dot{D}_γ (mGy/rok)

Státní ústav radiální ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 24 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Stanovení příkonů dávek \dot{D}_c z kosmického záření [ICRU, 2002; Cinelli et al., 2017]

Výpočet vychází z referenčních hodnot pro $\dot{D}_c(0)$ při hladině moře v pásmu zeměpisných šířek odpovídajících Evropě, které se uvnitř cihlové zdi pohybují v rozmezí 0.15 až 0.2 mGy/rok [ICRU, 2002]. Nižší hodnota odpovídá vnitřní straně zdi, vyšší hodnota vnější straně zdi. Pro danou nadmořskou výšku h se odpovídající hodnota \dot{D}_c vypočte následovně [Cinelli et al., 2017]:

$$\dot{D}_c(h) = \dot{D}_c(0) \cdot [0.21e^{-1.649h} + 0.79e^{0.4528h}]$$

Pro praktický výpočet hodnot \dot{D}_c slouží výpočetní tabulka C ve formě listu aplikace Excel „M24 Calculation.xlsx“, která je k dispozici zde: S:\Certifikované metodiky\M24 (viz obr. 6).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Výpočetní tabulka C										
2	M24 Výpočet příkonu D_c az kosmického záření ve zdi										
3	ICRU Report 68 (p.68)										
4	Cinelli, G. et al., 2017. European annual cosmic-ray dose: estimation of polupation exposure. Journal of Maps. Vol. 13, No. 2, 812 - 821										
5											
6	Identifikace vzorku	Cihla 3									
7											
8			Horní mez	Střed	Dolní mez						
9		Nadmořská výška (km)	D_c (mGy/rok)	D_c (mGy/rok)	D_c (mGy/rok)						
10	Hladina moře	0	0.2	0.175	0.15	Referenční hodnoty dle ICRU Report 68					
11	Výpočet	0.3	0.21	0.18	0.15	Výpočet dle Cinelli et al., 2017					
12											
13											
14	Výsledky										
15	D_c (mGy/rok)	vnější strana	0.21								
16	D_c (mGy/rok)	střed	0.18								
17	D_c (mGy/rok)	vnitřní strana	0.15								
18											
19											
20											
21											
22											

Obr. 6. Tabulka pro automatický výpočet příkonu \dot{D}_c z kosmického záření (mGy/rok)

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 25 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 3: TERMOLUMINISCENČNÍ DETEKTORY PRO MĚŘENÍ V CIHLÁCH A PODOBNÝCH MATERIÁLECH

Termoluminiscenční detektory (TLD) pro měření dávkové distribuce v pálených cihlách a jiných materiálech použitých pro extrakci křemene

Pro měření dávkové distribuce jsou vhodné TLD typu $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ a $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$ ve formě peletky o průměru 4.5 mm. Pro tyto detektory byla experimentálně ověřena shoda mezi vypočtenými a naměřenými hloubkovými dávkovými křivkami v cihlách. Nicméně v případě spekter záření gama s významnou nízkoenergetickou složkou (< 200 keV) a pro měření ve větších hloubkách by měly být přednostně použity detektory $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$, které mají příznivější energetickou závislost odezvy [Ekendahl et al., 2021a].

Pro použití v cihlách je třeba peletky po 3 kusech vložit do tenkých plastových pouzder Rados bez filtrů, které jsou následně zataveny do ochranné fólie. V případě detektorů $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ je vhodné využít detektory, které jsou již součástí systému Rados, čímž je zajištěna homogenita odezev do 3% pro použitý soubor detektorů (viz metodika M4 [Čemusová, 2021]). V případě $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$ je třeba provést předvýběr souboru detektorů s homogenitou do 3%. Do materiálu (cihly) je třeba vyvrtat otvory odpovídající rozměru pouzdra.

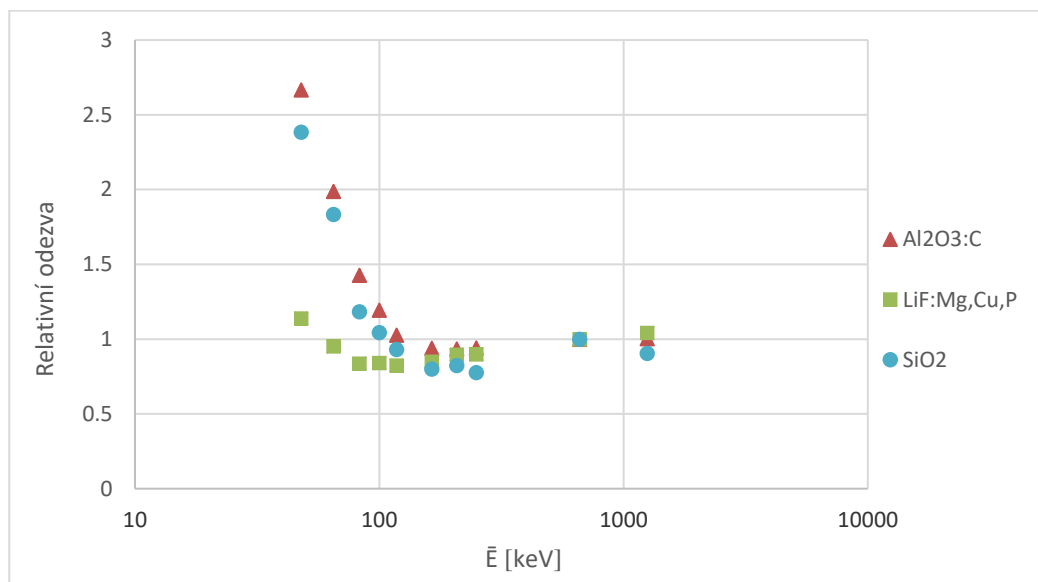
V tabulce 4 jsou shrnuty údaje o použité čtečce a parametry pro annealing a měření.

Tabulka 4. Údaje k aplikaci TLD pro měření v cihlách

Detektor	Čtečka	Annealing	Měření TL
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$	Mirion RE 2000	přístrojový při konstantní teplotě 300°C po dobu 12 s (viz metodika M4 [Čemusová, 2021])	předehřev a čtení při konstantní teplotě 300°C, doby předehřevu a čtení dle použité skupiny $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ (viz metodika M4 [Čemusová, 2021])
$\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$	Harshaw 3500	v peci při konstantní teplotě 240°C po dobu 10 min	předehřev při teplotě 165°C po dobu 10 s, čtení při rychlosti ohřevu 15°C/s do maximální teploty 240°C aplikované po dobu 13 1/3 s.

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 26 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Experimentálně stanovená **energetická závislost detektorů $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ a $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$** v porovnání s energetickou závislostí křemene (SiO_2) je znázorněna na obr. 7.

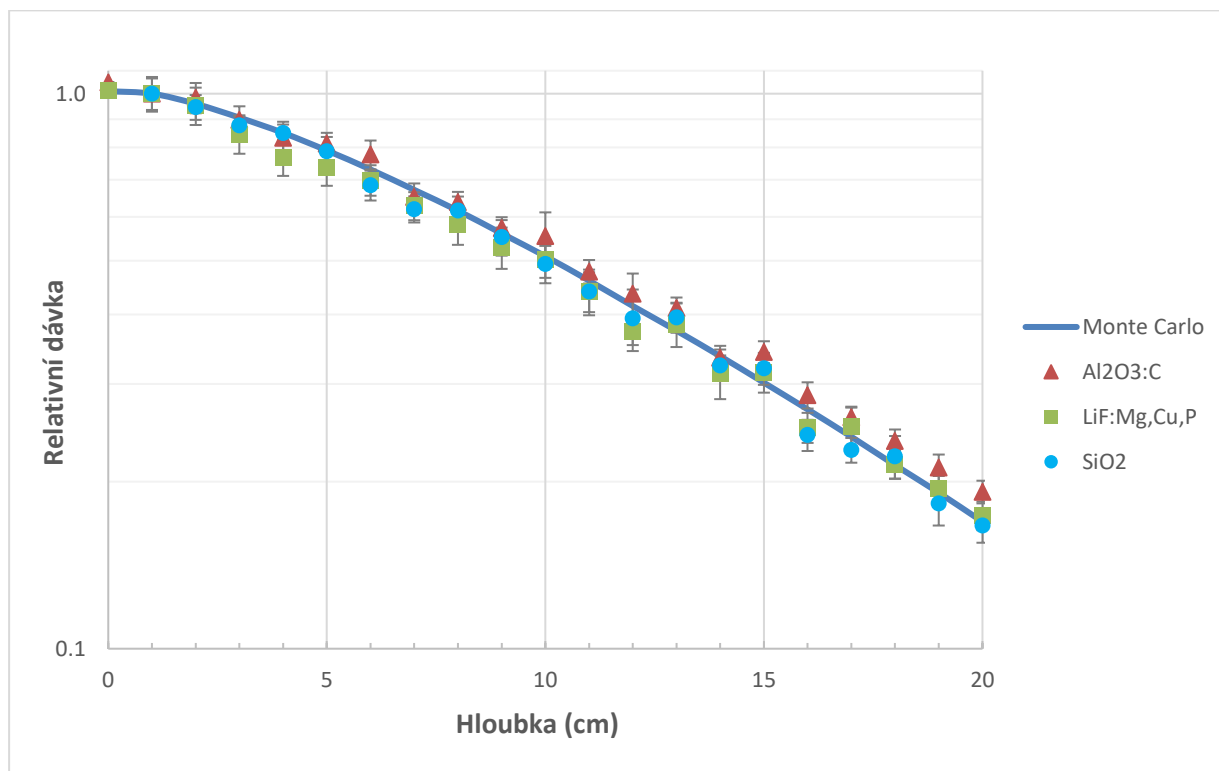


Obr. 7. Energetická závislost detektorů $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$, $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$ a křemene (SiO_2)

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 27 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 4: HLOUBKOVÁ DÁVKOVÁ KŘIVKA V CIHLE PRO EXTERNÍ ZDROJ ZÁŘENÍ ¹³⁷Cs

Vypočtená a naměřená hloubková dávková distribuce v cihle pro zdroj záření ¹³⁷Cs je ilustrována na obr.7.

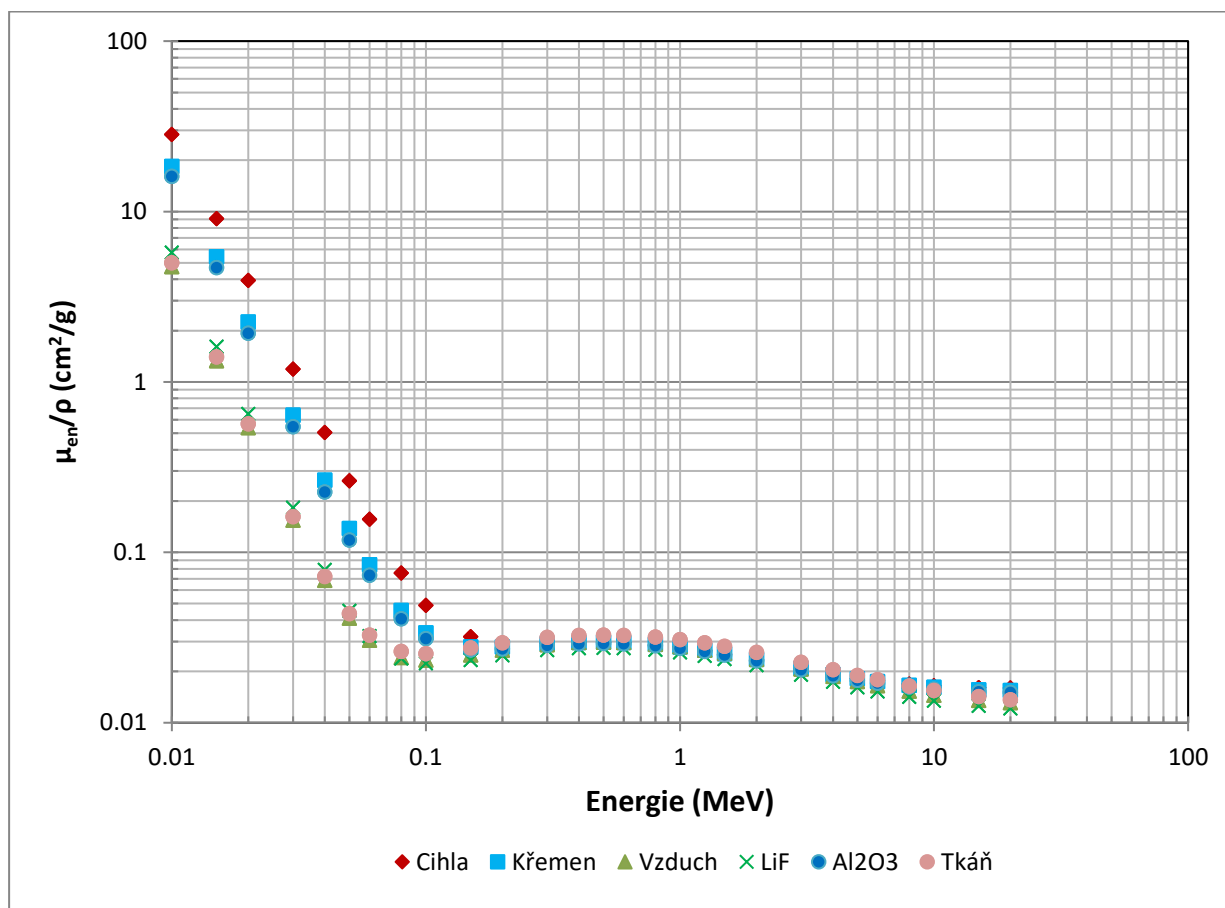


Obr. 7. Hloubkové dávkové křivky v cihle pro zdroj záření ¹³⁷Cs vypočtené metodou Monte Carlo a naměřené pomocí TLD Al₂O₃:C, LiF:Mg,Cu,P a křemene (SiO₂) extrahovaného z cihly [Ekendahl et al., 2021a].

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M24	List: 28 ze 28
	Soubor postupů pro stanovení dávky nebo dávkového příkonu a jeho distribuce v rámci komplexní retrospektivní dozimetrické rekonstrukce	Datum účinnosti: 1.7.2022 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 5: VYPOČTENÉ HODNOTY HMOTNOSTNÍCH SOUČINITELŮ ABSORPCE ENERGIE

Vypočtené hodnoty hmotnostních součinitelů absorpce energie pro cihlu, křemen, vzduch, tkáň a termoluminiscenční detektory LiF:Mg,Cu,P a Al₂O₃:C v závislosti na energii fotonů jsou znázorněny na obr. 8.



Obr. 8. Hodnoty μ_{en}/ρ pro cihlu, křemen, LiF:Mg,Cu,P, Al₂O₃:C, tkáň a vzduch vypočtené s využitím dat NIST