



Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.

Oddělení dozimetrie

Bartoškova 28, 140 00 Praha 4

Metodika M21

Certifikovaná metodika

Retrospektivní dozimetrie

Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu

Vypracoval

Funkce	Jméno	Datum	Podpis
Vedoucí oddělení dozimetrie	Ing. Daniela Ekendahl	23.8.2019	

Přezkoumal a schválil

Funkce	Jméno	Datum	Podpis
Náměstek pro RO	Mgr. Aleš Froňka, PhD.	30.8.2019	
Archivní označení	SÚRO 261-M21-0	Číslo revize	0
Výtisk číslo	1	Datum účinnosti	1.1.2020

Rozdělovník

Výtisk	Převzal	Datum	Podpis
č. 1	Síťový disk S:\Certifikované metodiky\ M21.pdf Ing. Daniela Ekendahl		
č. 2			
č. 3			

Vypracováno v rámci projektu VI20152020033
Bezpečnostního výzkumu:
**Metodiky pro stanovení radiačních dávek osob
v kontextu hrozby jaderného a radiologického
terorismu**

Rok uplatnění

2019

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 3 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 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. Příkon absorbované dávky	5
3. POPIS METODY	6
3.1. Měřicí systém	6
3.2. Materiál	9
3.3. Příprava vzorků	9
3.4. OSL signál	10
3.5. Analytický protokol	11
3.6. Verifikace a zabezpečení jakosti	13
3.7. 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
PRAKTICKÉ PŘÍLOHY	17
Příloha 1: Laboratorní pomůcky a nástroje pro přípravu vzorků	18
Příloha 2: Rekonstrukce dávky – sled jednotlivých kroků a procedur	19
Příloha 3: Nastavení parametrů měření	20
Příloha 4: Kalibrace pomocí interního ozařovače $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	21
Příloha 5: Korekce na fading	23
Příloha 6: Korekce energetické závislosti	24
Příloha 7: Vztah mezi dávkou v tkáni a dávkou v křemenu	25
Příloha 8: Výpočetní tabulka „M21 DOSE CALCULATION CHIP“	26
Příloha 9: Nejistota stanovení dávky	27
Příloha 10: Vzor protokolu	28

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 4 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

1. CÍL METODIKY

V případě závažných radiačních nehod nebo při událostech úmyslného zneužití radioaktivních látek může dojít k významnému externímu ozáření osob jak z řad zasahujících složek, tak i obyvatel. Pak je třeba odhadnout dávky těchto osob pro účely triáže, aby zasaženým mohla být co nejdříve poskytnuta adekvátní lékařská péče. K dozimetrii záření X a gama mohou být použity běžné předměty osobní potřeby, pokud obsahují keramické materiály vykazující radiačně indukovanou luminiscenci, kterou lze stimulovat termálně (TL) nebo opticky (OSL). Takovým materiálem je i sklo-epoxidové pouzdro čipového modulu, který se nachází v běžných čipových platebních kartách. Čipové karty patří do kategorie osobních předmětů obvykle nošených v blízkosti těla, a tedy mohou být eventuálně využity pro rekonstrukci dávky, kterou byla osoba ozářena.

Cílem této metodiky je specifikovat postup pro odhad osobní dávky ze záření gama na základě měření OSL signálu z čipových modulů extrahovaných z běžných platebních karet.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 5 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 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 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. PŘÍKON ABSORBOVANÉ DÁVKY

Příkon absorbované dávky, \dot{D} je definován jako podíl přírůstku dávky dD v časovém intervalu dt a tohoto intervalu,

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Jednotkou příkonu absorbované dávky je $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 6 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

3. POPIS METODY

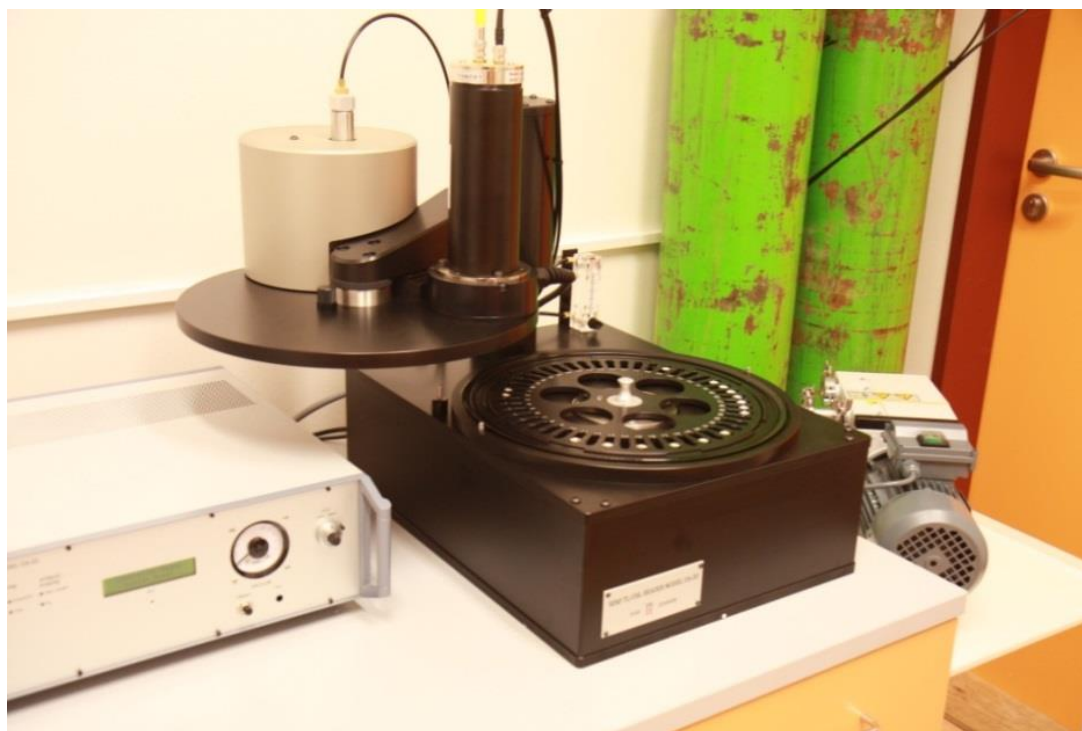
3.1. MĚŘÍCÍ SYSTÉM

Měření luminiscenčního signálu z elektronických součástek se provádí pomocí aparatury **Risø TL/OSL – model DA-20** (viz obr. 1), která se skládá z následujících částí:

- Systému pro detekci světla
- Systému pro tepelnou a optickou stimulaci luminiscence
- Ozařovače vzorků
- PC se SW aplikacemi pro řízení měření, záznam a zpracování výsledků
- Příslušenství

Systém pro detekci světla

Systém detekce světla je tvořen fotonásobičem a optickým filtrem. Fotonásobič je z řady bialkalických fotonásobičů EMI 9235QB, které mají maximální detekční účinnost mezi 200 a 400 nm a vyhovují pro detekci luminiscence z běžných dozimetrických materiálů. Použitý detekční filtr v základní konfiguraci je typ Hoya U-340 s transmisí pro vlnové délky od 200 do 400 nm. Tento filtr zabraňuje průniku rozptýleného modrého stimulačního světla (~ 470 nm) do fotonásobiče. V závislosti na aplikaci mohou být použity i jiné filtry (např. Schott BG-39, Corning 7-59). Charakteristiky těchto filtrů jsou uvedeny v uživatelské příručce [DTU, 2008].



Obr. 1: Měřicí část aparatury Risø TL/OSL – model DA-20

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 7 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Systém pro tepelnou a optickou stimulaci luminiscence

a) Stimulace TL

K vyhřívání vzorků slouží topný článek, který je umístěn přímo pod fotonásobičem. Tento topný článek zároveň je součástí zvedacího mechanismu, který posunuje vzorek do polohy pro měření. Vyhřívání je prováděno přiváděním regulovaného elektrického proudu přes topný článek. Teplota je kontrolována termočlánkem. Topný systém je schopen vyhřívát vzorky až do teploty 700°C při konstantním nárůstu teploty od 0.1 do 10°C/s. Při použití rychlosti ohřevu vyšší než 5°C/s je třeba počítat s teplotním zpožděním mezi vzorkem a topným článkem. Topný systém je třeba chránit průtokem dusíku, který je prevencí před oxidací při vyšších teplotách.

b) Stimulace OSL

Zařízení je vybaveno dvěma světelnými zdroji: infračervenými (IR) světelnými diodami a modrými světelnými diodami. Světelné diody jsou uspořádány soustředně v držáku kruhového tvaru tak, aby světlo směřovalo na vzorek. Vzdálenost mezi vzorkem a diodami je přibližně 20 mm. V základní konfiguraci jsou používány modré diody.

Modré diody mají světelný pík emise na vlnové délce **470 nm**. Toto světlo umožňuje stimulaci křemene, safíru ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) i některých dalších krystalických materiálů, např. halogenidů. Celkový výkon těchto 28 světelných diod je **50 mW/cm²** v poloze vzorku. Intenzitu modrého stimulačního světla lze nastavovat.

Infračervené diody emitují světlo o vlnové délce kolem **870 nm**, které může stimulovat luminiscenci u většiny živců. Držák obsahuje 21 těchto diod, které poskytují maximální výkon přibližně **145 mW/cm²** v poloze vzorku.

Měřicí systém Risø TL/OSL Model DA-20 umožňuje světelnou stimulaci ve dvou režimech:

- Stimulace při konstantní intenzitě světla (**CW**)
- Stimulace při lineárně modulované intenzitě světla (**LM**)

V případě režimu CW stimulace se vytváří exponenciálně klesající signál, jak postupně dochází k vyprazdňování elektronových záchytných center. Při režimu LM stimulace jsou elektrony v záchytných centrech velmi citlivých na světlo uvolňovány při nízkých intenzitách světla, zatímco elektrony v méně citlivých záchytných centrech jsou uvolňovány při vyšších intenzitách osvětlení. Naměřený signál pak má podobu křivky s píkem, resp. s několika píky, které odpovídají vyprazdňování jednotlivých elektronových pastí. Detekce emitovaného luminiscenčního světla probíhá souběžně se stimulací, přičemž stimulační a detekované světlo je vzájemně odděleno pomocí vhodných optických filtrů [DTU, 2008].

Ozařovače vzorků

Měřicí systém Risø TL/OSL Model DA-20 obsahuje dva uzavřené radionuklidové zářiče (URZ) klasifikované jako jednoduché zdroje, které umožňují *in-situ* ozáření vzorků v rámci naprogramované procedury.

a) Zdroj ⁹⁰Sr/⁹⁰Y

URZ ⁹⁰Sr/⁹⁰Y emituje beta záření s maximální energií 2.27 MeV. Aktivita zdroje je 1,48 GBq (ke dni 22.12.2009), což poskytuje dávkový příkon 0.109 Gy/s pro vzorek z křemene v poloze měření (ke stejnému dni). Tato výrobcem daná hodnota dávkového příkonu byla ověřena skrze porovnání spočívající v měření vzorku po referenčním ozáření externím zdrojem ¹³⁷Cs. Poločas přeměny ⁹⁰Sr/⁹⁰Y je **T_{1/2} = 29.12 roků** [Turner, 2007]. Tento zdroj se užívá jako interní ozařovač pro aplikace retrospektivní dozimetrie.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 8 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

b) Zdroj ^{241}Am

URZ ^{241}Am (10.7 MBq, alfa záření ≈ 5.49 MeV, gama záření ≈ 59.5 keV) je používán pouze pro experimentální výzkumné účely.

PC se SW aplikacemi pro řízení měření, záznam a zpracování výsledků

Součástí měřicího systému je PC se čtyřmi technologickými SW aplikacemi:

a) Aplikace *Sequence Editor*

Aplikace **Sequence Editor** se používá k vytvoření požadované měřicí sekvence (soubory typu SEQ), což jsou uživatelem definované posloupnosti procedur, které mají být provedeny se vzorky. Měřicí sekvence může obsahovat ozáření vybraným zdrojem záření, osvětlení vybraným zdrojem světla, předehřev při zadané teplotě, OSL měření při zadaném režimu, zdroji světla a dalších parametrech (intenzita světla, doba měření, teplota při měření, počet datových bodů) a TL měření (teplota, rychlost vyhřívání, počet datových bodů). Již definované sekvence mohou být uloženy nebo modifikovány pro další měření. Aplikace slouží rovněž pro záznam naměřených dat (soubory typu BIN). Podrobnosti jsou uvedeny v uživatelské příručce [DTU, 2016b].

b) Aplikace *Control*

Aplikace **Control** slouží ke kontrole technických parametrů čtečky a používá se při údržbě zařízení.

c) Aplikace *View*

Aplikaci **View** lze využít k zobrazení a tisku OSL nebo TL křivek. Kromě toho umožňuje prohlížení, tisk a export těchto naměřených dat obsažených v BIN souborech. Dle zadaných mezí lze provádět integraci těchto dat.

d) Aplikace *Analyst*

Aplikace **Analyst** obsahuje nástroje pro zpracování a analýzu vstupních dat ve formě BIN souborů pořízených v aplikaci Sequence Editor. V rámci této aplikace je možné provádět normalizaci odezev vzorků vzhledem k vybraným parametrům. Součástí aplikace jsou i některé analytické protokoly (SAR, MAA) běžně používané při datování a retrospektivní dozimetrii. Podrobnosti jsou uvedeny v uživatelské příručce [DTU, 2016a].

Příslušenství

K měřicímu systému náleží dva vyjímatelné **karusely** s kovovými **mističkami na vzorky**. Do karuselu lze umístit 48 kompatibilních mističek. Každý vzorek je jednoznačně identifikován pozicí mističky v karuselu (čísla 1 až 48). Karusel je nainstalován na motorem poháněnou otočnou desku, jejíž chod je ovládán prostřednictvím zadané měřicí sekvence.

K provozu měřicího systému jsou třeba dvě **tlakové nádoby s N_2** . N_2 musí být používán v případě měření s teplotou vyšší než 200°C . Druhá z tlakových nádob je využívána pro ovládání URZ $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. V obou případech je třeba kvalitní **tlakový regulátor** umožňující udržovat stabilní tlak **2,5 barů**.

Pro ovládání zdroje záření ^{241}Am musí být připojena **vakuová pumpa**.

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 9 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

3.2. MATERIÁL

Běžné platební karty obsahují integrované obvody (čipy), které umožňují zpracovávat data. Čipový modul je v kartě umístěn pod kovovou destičkou, která zprostředkovává přenos elektrického signálu mezi čipem a terminálem. Samotný čip se nachází ve sklo-epoxidovém ochranném pouzdře. Materiál tohoto pouzdra obsahuje křemen, který je po ozáření zdrojem luminiscenčního signálu [Woda a Spöttl, 2009; Woda et al., 2012; Barkyoumb a Mathur, 2008; Mathur et al., 2007]. Pro dozimetrii lze využít pouze průhledná sklo-epoxidová pouzdra, která jsou propustná pro světlo.

3.3. PŘÍPRAVA VZORKŮ

Proces přípravy vzorků zahrnuje extrakci citlivého materiálu z karty, úpravu rozměrů vzorku, umístění vzorku na misticčku pro měření a následné uzavření vzorku do prostoru přístroje Risø TL/OSL – model DA-20. Tyto procedury musí být prováděny **v podmínkách temné komory s červeným laboratorním světlem** na čisté pracovní ploše. Je třeba dbát na to, aby nedošlo ke znečištění vzorku. Jeho extrakci a úpravu je vhodné provádět v čistých rukavicích. Postup je následující:

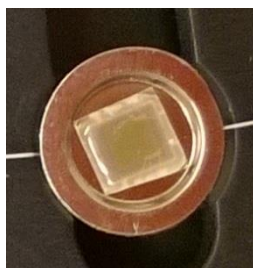
- 1) Destičku i s připevněným modulem je třeba vyjmout z karty vylomením z plastového těla karty, v případě potřeby lze k oddělení využít pomocný nástroj, například skalpel.
- 2) Následně je třeba odkrýt čipový modul, který se nachází na spodní straně vylomené části (viz obr. 2). Pokud to nejde jednoduše ručně, lze v případě potřeby použít skalpel a pinzetu.



Obr. 2: Karta s čipovým modulem

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 10 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

- 3) Část se sklo-epoxidovým pouzdem je následně třeba vystříhnout tak, aby svými rozměry odpovídala mističkám na vzorky používaným při měření, tj. největší rozměr by neměl přesahovat 5 mm.
- 4) Vzorek se do mističky pokládá tak, aby epoxidová pryskyřice směřovala vzhůru (viz obr. 3)
- 5) Mistička se vzorkem se umístí na zvolenou pozici do karuselu pro měření, který je následně uzavřen do prostoru přístroje Risø TL/OSL – model DA-20, poté je již možné pracovat za běžného laboratorní osvětlení.



Obr. 3: Vzorek na mističce v pozici pro měření

Přehled pomůcek potřebných k přípravě vzorků je uveden v **Příloze 1**.

Sled navazujících kroků a procedur potřebných pro vyhodnocení vzorku a stanovení dávky je v **Příloze 2**. Podrobný výklad k jednotlivým procedurám dále následuje v částech 3.4. a 3.5.

3.4. OSL SIGNÁL

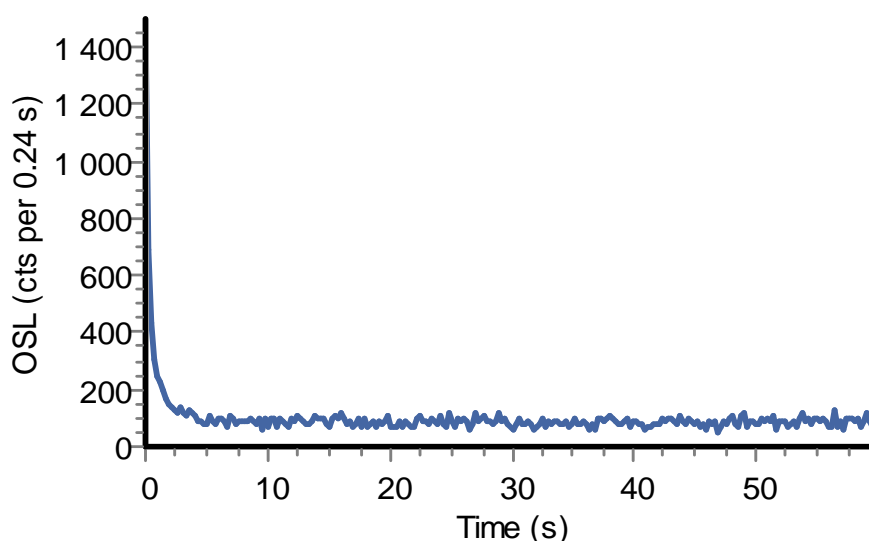
Sklo-epoxidový materiál vykazuje po ozáření luminiscenci, kterou lze stimulovat modrým světlem. Parametry použité pro měření OSL signálu z ozářených čipových modulů vychází z analýzy provedené v původní práci [Čemusová a Ekendahl, 2016]. Jednotlivé měření vzorku sestává ze stimulace vzorku modrým světlem o konstantní intenzitě při pokojové teplotě, konkrétně:

Režim měření CW-OSL s intenzitou modrého světla 45 mW/cm² a teplotě 20-25°C po dobu 60s.

S OSL signálem vzorku lze pracovat v aplikaci **Analyst** [DTU, 2016a]. Velikost signálu se kvantifikuje ze zaznamenané CW-OSL křivky (viz obr. 4) jako integrál odezvy za první dvě sekundy měření zmenšený o hodnotu pozadí odpovídající integrálu za poslední dvě sekundy měření.

Velikost měřeného signálu je závislá především na dávce a na čase uplynulém od ozáření [Čemusová a Ekendahl, 2016; Woda et al., 2012]. Minimální detekovatelná dávka (MDD) pro vzorek měřený bezprostředně po ozáření je přibližně 0,1 Gy. S rostoucím časem dochází k nárůstu MDD v závislosti na míře fadingu, tj. násobkem inverzní hodnoty funkce uvedené v Příloze 5 [Čemusová a Ekendahl, 2016; Ekendahl et al., 2019]. Velikost OSL signálu také závisí na energii fotonů, pro energie < 200 keV dochází k významnému nárůstu odezvy relativně k odezvě pro ¹³⁷Cs [Čemusová a Ekendahl, 2016].

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 11 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl



Obr. 4: Příklad OSL křivky (výstup aplikace Analyst [DTU, 2016a])

3.5. ANALYTICKÝ PROTOKOL

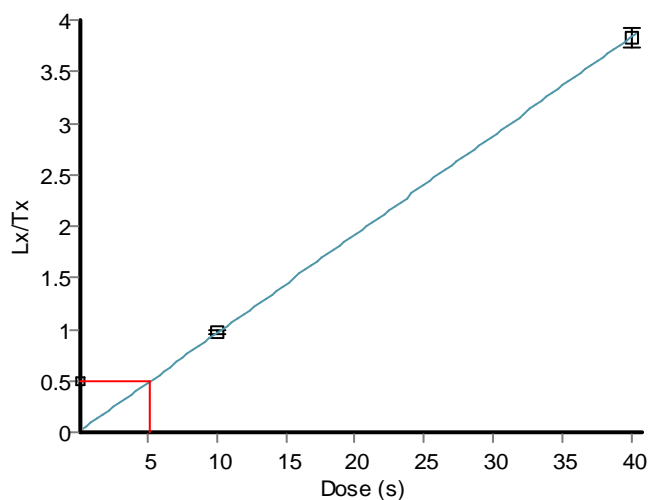
Metoda rekonstrukce dávky je založena na opakovaných měřeních a ozářeních vzorku v rámci analytického protokolu SAR („Single-Aliquot Regenerative-dose“) [Bøtter-Jensen et al., 2003]. Výhodou tohoto protokolu je, že umožňuje korigovat významné změny citlivosti, ke kterým dochází při opakovaném ozáření a měření sklo-epoxidových vzorků obsahujících zrna křemene. Protokol SAR se skládá z několika cyklů měření, které umožňují konstrukci závislosti korigovaného OSL signálu na dávce. Parametry procedur zahrnutých v i -tém cyklu v rámci protokolu SAR jsou [Ekendahl et al., 2019]:

- (1) Aplikace regenerativní dávky D_i
- (2) Měření CW-OSL za stimulace modrým světlem o intenzitě 45 mW/cm^2 při pokojové teplotě po dobu 60 s; záznam hlavního OSL signálu L_i
- (3) Aplikace neměnné testovací dávky D_t
- (4) Měření CW-OSL za stimulace modrým světlem o intenzitě 45 mW/cm^2 při pokojové teplotě po dobu 60 s; záznam hlavního OSL signálu T_i

Příklad nastavení měřící procedury v aplikaci Sequence Editor a komentář k volbě regenerativních dávek a testovací dávky je v **Příloze 3**.

Hodnoty získaných poměrů L_i/T_i ($i \geq 1$) reprezentují na změny citlivosti korigovaný OSL signál závislý na dávce D_i . Pomocí těchto hodnot je pak konstruována křivka závislosti OSL signálu na dávce D_i . Pro tento účel je v prvním cyklu měření ($i=0$) měřena hodnota L_0/T_0 vztažená k měřené dávce D_0 odpovídající skutečné expoziční situaci, tedy hodnota aplikované regenerativní dávky je nulová. Hodnoty regenerativních dávek aplikovaných v dalších cyklech se volí vzestupně. Hodnota testovací dávky se volí jako $D_t \leq D_1$. Hodnota D_0 , je-li předem orientačně známa, by ideálně měla být mezi nejmenší a největší regenerativní dávkou. Vzhledem k tomu, že v případě vzorků čipových modulů je závislost signálu L_i/T_i na dávce lineární [Ekendahl et al., 2019], postačují 3 cykly měření. Výsledek rekonstrukce dávky pomocí protokolu SAR spočívá ve spojení hodnoty L_0/T_0 s dávkou na základě využití funkce závislosti L_i/T_i ($i \geq 1$) na dávce (viz obr. 5).

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 12 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl



Obr. 5: Závislost OSL signálu na aplikované dávce (výstup aplikace Analyst [DTU, 2016a])

Aplikaci protokolu SAR lze provést v programu Analyst [DTU, 2016a]. Hodnota D_0 (na obr. 5 odpovídá červenému bodu na vodorovné ose) je vyjádřena v počtu ekvivalentních sekund, které by odpovídaly aplikaci odpovídající dávky interním ozařovačem beta pro dosažení signálu L_0/T_0 .

Hodnotu D_0 (s) získanou v rámci aplikace analytického protokolu SAR je třeba převést na hodnotu dávky v křemenu $D(SiO_2)_0$, a to ze stanoveného dávkového příkonu v křemenu v místě pozice vzorku. Údaje ke kalibraci pomocí interního ozařovače jsou uvedeny v Příloze 4.

Hodnotu dávky v křemenu je však ještě nutné vynásobit korekčním faktorem na fading, tj. na úbytek odezvy, ke kterému došlo za dobu uplynulou od ozáření do měření. Odvození korekce na fading vychází z funkce vypočtené na základě experimentálních dat pro závislost OSL signálu na době uplynulé od ozáření [Ekendahl et al., 2019]. Postup výpočtu korekčního faktoru na fading je uveden v Příloze 5.

Protože OSL signál vykazuje energetickou závislost [Čemusová a Ekendahl, 2016], může být v případě expozice nízkenergetickému záření výsledná dávka nadhodnocena. Je-li tomu tak a je-li známo energetické spektrum záření, je třeba odvodit korekční faktor na základě dat v Příloze 6. V případě, že spektrum záření není známo, se korekce energetické závislosti neprovádí a stanovená hodnota dávky představuje konzervativní odhad.

Čipové karty jsou obvykle nošeny v blízkosti těla v různých plastových pouzdrech nebo peněženkách. V takovém případě lze uvažovat tkáni-ekvivalentní vrstvu. Hodnota dávky v tkáni v okolí čipu pak může být odhadnuta na základě poměrů hmotnostních součinitelů absorpce energie pro křemen a tkáň: $D(tkáň) = D(SiO_2) \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{tkáň} / \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{SiO_2}$. Hodnoty poměrů hmotnostních součinitelů absorpce energie byly vypočteny s využitím dat databáze fyzikálních dat [NIST] a jsou uvedeny v Příloze 7.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 13 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

K zadání vstupních údajů, aplikaci korekčních faktorů a výpočtu dávky výše uvedeným postupem slouží výpočetní tabulka **M21 Dose Calculation Chip** vytvořená v aplikaci Excel, která je k dispozici zde:

S:\Certifikované metodiky\M21 (viz ilustrace výpočetní tabulky v **Příloze 8**).

V této tabulce je již implementován výpočet korekčního faktoru na fading.

Nejistoty stanovení dávky jsou uvedeny v **Příloze 9**.

Výstupem provedené analýzy je **protokol**, kde jsou uvedeny základní údaje týkající se analyzovaného materiálu a odhadnutá osobní dávka v místě polohy karty. Vzor protokolu je uveden v **Příloze 10**.

3.6. VERIFIKACE A ZABEZPEČENÍ JAKOSTI

Metodika byla ověřena pomocí experimentální studie, kde byly různé platební karty ozářeny na fantomu simulujícím lidské tělo [Ekendahl et al., 2019]. Naměřené dávky byly porovnány s referenčními hodnotami, přičemž odchylky stanovené dávky od referenční hodnoty byly pro použité expoziční podmínky do $\pm 12\%$, což je plně akceptovatelné.

Pro účely havarijní připravenosti bude metodika experimentálně aplikována minimálně jednou ročně, a to buď formou místního experimentu simulujícího možné ozáření osoby, nebo formou mezinárodních porovnávacích měření [Ainsbury et al., 2017].

3.7. ZÁZNAMY NEBO VÝSTUPNÍ DOKUMENTACE

Záznamy vztažené k měření a vyhodnocení dávky pomocí čipového modulu extrahovaného z karty jsou uchovávány v těchto formách:

- Vstupní údaje od zadavatele měření
- Deník měření
- Elektronické záznamy o měření v rámci použitých laboratorních SW aplikací
- Protokoly z měření (vzor viz **Příloha 10**)

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 14 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 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 radiální ochrany poskytuje pro potřeby Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Jedná se o další z nových metodik retrospektivní dozimetrie v ČR na bázi využití radiačně indukované luminiscence netradičních materiálů, které nejsou klasickými radiačními detektory. Metodika je určena pro odhad dávky osob ozářených při závažných radiačních nehodách a událostech, které v době ozáření nebyly vybaveny klasickými dozimetry, ale měly v blízkosti těla kartu s čipovým modulem. Včasný odhad dávky je základním předpokladem pro efektivní triáž zasažených osob. Časová náročnost vyhodnocení dávky z čipového modulu je přibližně 30 minut. Metodika je v zásadě použitelná pro vyhodnocení dávek v řádu od desetin až do desítek Gy [Čemusová a Ekendahl, 2016]. Největší význam však metodika má v případě ozářených osob s podezřením na možnost deterministických účinků případně u osob s existujícími projevy deterministických účinků. Konkrétní hodnota minimální detekovatelné dávky závisí na čase uběhlém od ozáření. S ohledem na dávky, od kterých se začínají projevovat deterministické účinky, a s ohledem na hodnotu MDD = 0.1 Gy v čase 0.001 d po ozáření lze usuzovat, že metodika bude z důvodu fadingu OSL signálu použitelná v průběhu maximálně prvních 10 dní po ozáření.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 15 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

5. SEZNAM POUŽITÉ SOUVISEJÍCÍ LITERATURY

Ainsbury, E. et al., 2017. Integration of new biological and physical retrospective dosimetry methods into EU emergency response plans- joint RENEB and EURADOS inter-laboratory comparisons. *Int. J. Radiat. Biol.* 93, 99-109

Barkyoub, J.H. a Mathur, V.K., 2008. Epoxy encapsulant as serendipitous dosimeters during radiological/nuclear events. *Radiat. Meas.* 43, 841-844

Bøtter-Jensen, L. et al., 2003. Optically stimulated luminescence dosimetry. Elsevier Science B.V., ISBN 0-444-50684-5

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

DTU, 2008. Uživatelská příručka. Guide to „The Risø TL/OSL Reader“. DTU Nutech, Denmark.

DTU, 2016a. Uživatelská příručka. Analyst, v. 4.31.9. DTU Nutech, Denmark.

DTU, 2016b. Uživatelská příručka. The Sequence Editor. DTU Nutech, Denmark.

Mathur, V.K. et al., 2007. Radiation sensitivity of memory chip module of an ID card. *Radiat. Meas.* 42, 43-48

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

Turner, J.E., 2007. Atoms, Radiation, and Radiation Protection. Wiley-VCH Verlag, Weinheim. ISBN 978-3-527-40606-7

Woda, C. a Spöttl, T., 2009. On the use of OSL of wire-bond chip card modules for retrospective and accident dosimetry. *Radiat. Meas.* 44, 548-553

Woda, C. et al., 2012. On the use of OSL chip card modules with molding for retrospective and accident dosimetry. *Radiat. Meas.* 47, 1068-1073

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 16 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

6. SEZNAM VÝSTUPŮ A PUBLIKACÍ PŘEDCHÁZEJÍCÍCH METODICE

Čemusová, Z. a Ekendahl, D., 2016. Dozimetrické vlastnosti čipových modulů extrahovaných z běžných platebních a SIM karet. Experimentální studie. Zpráva SÚRO č. 16/2016. SÚRO, 2016.

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.

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.

Ekendahl, D. et al., 2019. Retrospective dose reconstruction with mobile phones and chip cards. Radiat. Prot. Dosim. (přijato k publikaci, doi:10.1093/rpd/ncz203)

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 17 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PRAKTICKÉ PŘÍLOHY

Seznam příloh

- Příloha 1: Laboratorní pomůcky a nástroje pro přípravu vzorků
- Příloha 2: Rekonstrukce dávky – sled jednotlivých kroků a procedur
- Příloha 3: Nastavení parametrů měření
- Příloha 4: Kalibrace pomocí interního ozařovače $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$
- Příloha 5: Korekce na fading
- Příloha 6: Korekce energetické závislosti
- Příloha 7: Vztah mezi dávkou v tkáni a dávkou v křemenu
- Příloha 8: Výpočetní tabulka „M21 Dose Calculation Chip“
- Příloha 9: Nejistota stanovení dávky
- Příloha 10: Vzor protokolu

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 18 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 1: LABORATORNÍ POMŮCKY A NÁSTROJE PRO PŘÍPRAVU VZORKŮ

Pro přípravu vzorků a manipulaci s nimi musí být laboratoř – temná komora vybavena těmito pomůckami:

- zdroje červeného světla (lampy s červeným filtrem)
- laboratorní pinzety
- skalpel
- nůžky
- čisté rukavice

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 19 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 2: REKONSTRUKCE DÁVKY – SLED JEDNOTLIVÝCH KROKŮ A PROCEDUR

- 1) Připravit karusel s čistými mističkami na vzorky.
- 2) Provést ozáření prázdných mističek zdrojem beta (čas ozáření alespoň 10 s) a změřit OSL signál při CW stimulaci modrým světlem (90%, 40 s) pro účely detekce případných nečistot, které by mohly generovat falešný OSL signál.
- 3) Zkontrolovat, zda je OSL signál na úrovni pozadí. Pokud byl zjištěn OSL signál převyšující úroveň pozadí, použít čistou misku a znovu zkontrolovat.
- 4) Do deníku měření zaznamenat identifikační údaje měření
- 5) V temné komoře s červeným osvětlením opatrně vyjmout čipový modul vylomením, případně s pomocí skalpelu. Pracovat v rukavicích.
- 6) Pomocí pinzety a nůžek upravit velikost modulu, aby odpovídal rozměru mističky na měření
- 7) Vzorek umístit pomocí pinzety na mističku tak, aby průhledná strana sklo-epoxidu byla navrchu.
- 8) Karusel s mističkami a vzorky umístit do měřicí aparatury a uzavřít.
- 9) Lze rozsvítit laboratorní světlo.
- 10) Na PC nastavit proceduru měření – viz příklad **Příloha 3**.
- 11) Nastavit parametry procedury měření
- 12) Zaznamenat do aplikované hodnoty D_i ($i \geq 1$) a D_t v sekundách ozařování zdrojem beta (odpovídající aktuální příkony dávky interního zdroje beta jsou v **Příloze 4**)
- 13) Do deníku měření zaznamenat identifikaci vzorků a souboru měřených dat.
- 14) Aktivovat měření.
- 15) Po ukončení měření zkontrolovat naměřené výstupy pomocí aplikace Analyst a zkontrolovat nastavení pro výpočet protokolem SAR.
- 16) Aktivací protokolu SAR provést výpočet D_0 (s), pomocí **Přílohy 4** vyjádřit výsledek v Gy a zaznamenat do deníku měření
- 17) Vložit hodnotu D_0 (s) a další vstupní údaje do připraveného souboru pro výpočet dávky (viz **Příloha 8**)
- 18) Vyplnit protokol měření – viz **Příloha 10**.

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 20 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 3: NASTAVENÍ PARAMETRŮ MĚŘENÍ

Měřicí procedura se zadává prostřednictvím aplikace **Sequence Editor**. Na obrázku níže je uveden příklad zadání měření vzorku v pozici 1 pomocí protokolu SAR, který se skládá ze 3 cyklů. První cyklus měření (Run 1) odpovídá měření vzorku po „havarijním ozáření“, druhý cyklus (Run 2) odpovídá měření po aplikaci nižší regenerativní dávky a třetí cyklus (Run 3) odpovídá měření po aplikaci vyšší regenerativní dávky. Dávky jsou vyjádřené v sekundách doby ozáření zdrojem beta. V tomto konkrétním případě $D_1(SiO_2) = 10 \cdot \dot{D}(SiO_2)$ a $D_2(SiO_2) = 30 \cdot \dot{D}(SiO_2)$. Testovací dávka $D_t(SiO_2)$ je zde konkrétně volena jako $10 \cdot \dot{D}(SiO_2)$. Aktuální hodnoty $\dot{D}(SiO_2)$ jsou uvedeny v Příloze 4.

The screenshot shows the 'Sequence Editor' window with a table of measurement sets. The table has columns for 'Samples', 'Run 1', 'Run 2', 'Run 3', 'Run 4', and 'Run 5'. The data is as follows:

Set	Samples	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5
Set 1	1		Beta 10s	Beta 30s		
Set 2	1	OSL 25°C Blue LEDs;60.00s;5°C/s;90.0%	OSL 25°C Blue LEDs;60.00s;5°C/s;90.0%	OSL 25°C Blue LEDs;60.00s;5°C/s;90.0%		
Set 3						
Set 4	1	Beta 10s	Beta 10s	Beta 10s		
Set 5	1	OSL 25°C Blue LEDs;60.00s;5°C/s;90.0%	OSL 25°C Blue LEDs;60.00s;5°C/s;90.0%	OSL 25°C Blue LEDs;60.00s;5°C/s;90.0%		
Set 6						
Set 7						
Set 8						
Set 9						
Set 10						
Set 11						
Set 12						
Set 13						
Set 14						
Set 15						
Set 16						
Set 17						
Set 18						
Set 19						
Set 20						
Set 21						
Set 22						
Set 23						
Set 24						
Set 25						
Set 26						
Set 27						
Set 28						
Set 29						
Set 30						
Set 31						
Set 32						
Set 33						

Volba aplikovaných regenerativních dávek a testovací dávky by měla vycházet z předchozí analýzy události. Druhá regenerativní dávka se vždy volí větší než předpokládaná možná havarijní dávka. Testovací dávka D_t se volí na úrovni $D_t(SiO_2) \leq D_1(SiO_2)$.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 21 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 4: KALIBRACE POMOCÍ INTERNÍHO OZAŘOVAČE $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

Součástí rekonstrukce dávky je aplikace stanovených hodnot regenerativních dávek pomocí interního ozařovače $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Vlastnosti zdroje $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

$T_{1/2} = 29,1$ roků = 349,44 měsíců = 10 636 dní

Počáteční aktivita: $A_0 = 1,48 \text{ GBq}$ (ke dni 22.12.2009)

Aktivita po uplynutí času t : $A_t = 1,48 \cdot \exp\left(-t \cdot \ln 2 / T_{1/2}\right) \text{ GBq}$

Počáteční dávkový příkon v poloze vzorku: $\dot{D}(\text{SiO}_2)_0 = 0,109 \text{ Gy/s}$ (ke dni 22.12.2009)

Dávkový příkon po uplynutí času t : $\dot{D}(\text{SiO}_2)_t = \frac{A_t}{A_0} \cdot 0,109 \text{ Gy/s}$

Dávkový příkon ve skle

Vzhledem k tomu, že křemen je dominantním materiálem ve sklo-epoxidovém materiálu lze předpokládat platnost vztahu:

$$\dot{D}(\text{sklo-epoxid}) = \dot{D}(\text{SiO}_2).$$

Státní ústav radiční ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 22 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

Vypočtené hodnoty $\dot{D}(SiO_2)$ pro období 2020 až 2025

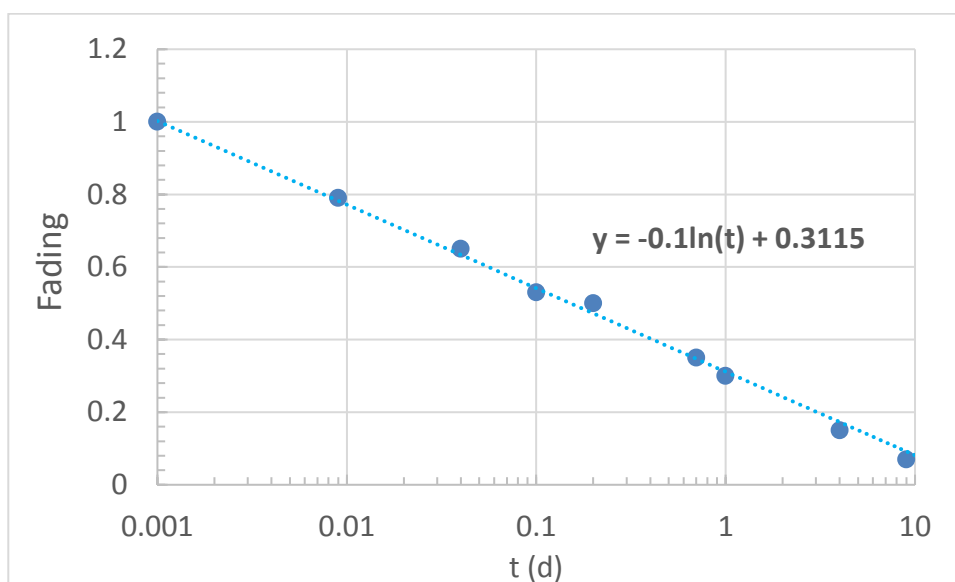
Datum	$\frac{A_t}{A_0}$	$\dot{D}(SiO_2) \left(\frac{Gy}{s}\right)$
1.1.2020	0.788	0.086
1.4.2020	0.783	0.085
1.7.2020	0.778	0.085
1.10.2020	0.774	0.084
1.1.2021	0.769	0.084
1.4.2021	0.765	0.083
1.7.2021	0.760	0.083
1.10.2021	0.756	0.082
1.1.2022	0.751	0.082
1.4.2022	0.747	0.081
1.7.2022	0.742	0.081
1.10.2022	0.738	0.080
1.1.2023	0.733	0.080
1.4.2023	0.729	0.079
1.7.2023	0.725	0.079
1.10.2023	0.720	0.079
1.1.2024	0.716	0.078
1.4.2024	0.712	0.078
1.7.2024	0.708	0.077
1.10.2024	0.703	0.077
1.1.2025	0.699	0.076
1.4.2025	0.695	0.076
1.7.2025	0.691	0.075
1.10.2025	0.687	0.075

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 23 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 5: KOREKCE NA FADING

Korekce na základě empirické funkce

Korekce na fading vychází z experimentálně stanovené funkce závislosti OSL signálu na době uplynulé od měření pro několik časových bodů (viz obrázek níže) [Ekendahl et al., 2019]. Tyto body byly proloženy logaritmickou funkcí. Naměřené hodnoty OSL signálu byly normalizovány vzhledem k hodnotě OSL signálu naměřené po čase potřebném pro automatický transport vzorku po ozáření interním ozařovačem beta do doby iniciace čtení OSL signálu. Tento čas je v průběhu měření konstantní. Fading je níže uveden do doby 10 dní po ozáření, kdy ještě metodika může být použitelná pro dávky na úrovni prahu deterministických účinků v rámci celotělového ozáření. V případě delší doby po ozáření by byl naměřený signál těžko rozlišitelný od pozadí, a tedy zatížený významně větší nejistotou.



Korekční faktor pro fading

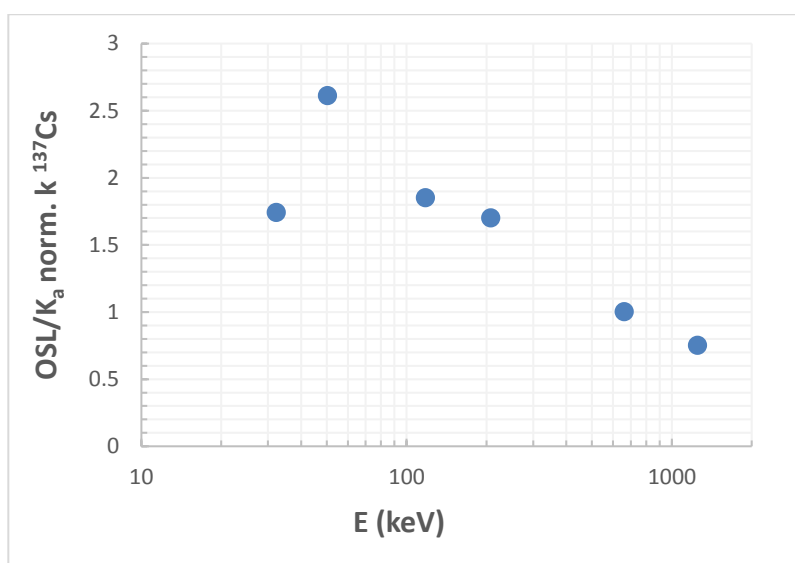
$$k_{fad} = \frac{1}{-0.1 \cdot \ln(t) + 0.3115}$$

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 24 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 6: KOREKCE ENERGETICKÉ ZÁVISLOSTI

V rámci práce [Čemusová a Ekendahl, 2016] byla měřena energetická závislost OSL signálu materiálu sklo-epoxidového pouzdra čipu. Hodnoty OSL signálu vztažené na jednotku kermy ve vzduchu (K_a) a normované vzhledem k hodnotě získané pro zdroj ^{137}Cs jsou uvedeny v tabulce a obrázku níže. Příslušný **korekční koeficient energetické závislosti (k_E)** OSL signálu je pak stanoven jako inverzní hodnota poměru OSL/K_a .

Spektrum	Střední energie (keV)	OSL/K_a	k_E
RQR3	32.3	1.74	0.57
RQR8	50.4	2.61	0.38
N150	118	1.85	0.54
N250	208	1.70	0.59
^{137}Cs	662	1.00	1.00
^{60}Co	1250	0.75	1.33
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	565	1.00	1.00



Z výsledků je zřejmé, že měření OSL signálu ozářených čipových modulů vede k přijatelnému, ve většině případů konzervativnímu, odhadu dávky v oblasti energií fotonů od 30 do 1250 keV. Ve výjimečném případě, kdyby došlo k ozáření fotony nižších energií a spektrum fotonů by bylo dostatečně přesně známo, je třeba výsledek korigovat korekčním koeficientem k_E , který vychází z hodnot v tabulce výše za současné aplikace konzervativního přístupu.

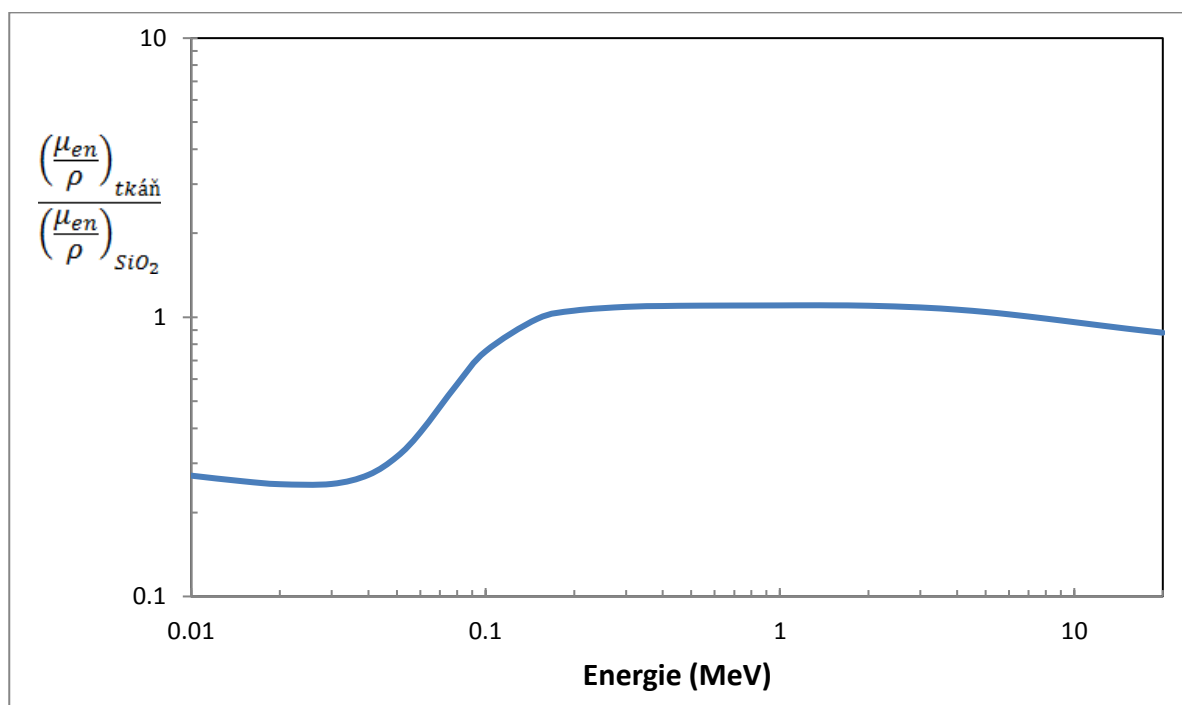
Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 25 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 7: VZTAH MEZI DÁVKOU V TKÁNI A DÁVKOU V KŘEMENI

Vztah mezi $D(\text{tkáň})$ a $D(\text{SiO}_2)$

$$D(\text{tkáň}) = D(\text{SiO}_2) \cdot \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{tkáň}} / \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{SiO}_2}$$

Hodnoty poměru hmotnostních součinitelů absorpce energie $\frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{tkáň}}}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{\text{SiO}_2}}$ jsou závislé na energii fotonů [NIST]:



Pro fotony o energii v rozmezí 200 keV až 2 MeV platí:

$$D(\text{tkáň}) = 1.1 \cdot D(\text{SiO}_2)$$

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 26 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 8: VÝPOČETNÍ TABULKA „M21 DOSE CALCULATION CHIP“

Výpočetní tabulka je ve formě souboru **M21 Dose Calculation Chip.xlsx** k dispozici [zde](#) [ŠE1][IDE2]:
S:\Certifikované metodiky\M21. Příklad výstupu je uveden níže.

	A	B	C	D	E
2	M21 DOSE CALCULATION CHIP				
3					
4	Do podbarvených buněk vložit platné údaje				
5	Identifikace čipového modulu	XY			
6	Číslo vzorku (v karuselu)	1			
7	Datum ozáření	1.10.18 11:10			
8	Datum OSL měření	4.10.18 13:50			
9	Časový rozdíl (d)	3.11			
10	Příkon dávky v křemenu (Gy/s)	0.086			
11	Výstup protokolu SAR D ₀ (s)	5.57			
12	Korekce na fading	5.050			
13	Korekce energetické závislosti	1			
14	Poměr mezi dávkou v tkáni a dávkou v křemenu	1.11			
15					
16	Výsledky				
17	Výsledná dávka v čipu (Gy)	2.419			
18	Výsledná dávka v tkáni (Gy)	2.685			
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 27 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 9: NEJISTOTA STANOVENÍ DÁVKY


Na základě provedených experimentů [Čemusová a Ekendahl, 2016; Ekendahl et al., 2019] byla zjištěna nejistota stanovení dávky takto:

Faktor	D_{sklo}	$D_{\text{tkáň}}$
Měření OSL signálu	6.5%	6.5%
Kalibrace zdrojem $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	3.5%	3.5%
Fading	3.9%	3.9%
Energetická závislost sklo-epoxidu*	21.3%	21.3%
Přepočet na dávku v tkáni*	-	1.3%
Nejistota $u = \sqrt{\sum_i u_i^2}$	22.88%	22.92%
Maximální rozšířená nejistota U(k=2) $U = 2 \cdot u$	45.76%	45.84%

*)Uvažovaná oblast energií fotonů od 200 keV do 2 MeV.

Státní ústav radiační ochrany, v. v. i.	Metodika M21	List: 28 ze 28
	Retrospektivní dozimetrie: Odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	Datum účinnosti: 1.1.2020 Za správnost: Ing. D. Ekendahl

PŘÍLOHA 10: VZOR PROTOKOLU

	Státní ústav radiační ochrany, v. v. i. Oddělení dozimetrie Bartoškova 28, 140 00 Praha 4
Protokol SÚRO M21/pořadové č./datum	
Retrospektivní odhad osobní dávky s využitím čipového modulu	
Datum měření	Uvést datum
Použitá metodika	M21
Vyhodnocení provedl/a	Uvést jméno a příjmení pracovníka
Specifikace měření	
Osoba/datum nar.	Uvést Jméno Příjmení/datum nar. ozářené osoby
Čipový modul	Popis předmětu (karty), odkud byl čipový modul získán, případně další důležité okolnosti
Čas ozáření	Uvést datum, čas, dobu trvání ozáření
Podmínky ozáření (zdroj, geometrie, pozice čipové karty vzhledem k tělu), odkaz na přílohu	Popsat podrobně okolnosti a podmínky ozáření osoby, jsou-li známy (případně připojit ve formě přílohy)
Aplikované korekce	Uvést, jaké korekce byly aplikovány
Výsledná dávka v čipovém modulu	Uvést hodnotu dávky ve skle včetně jednotky a nejistoty
Odhad dávky v tkáni v pozici čipové karty	Uvést hodnotu odhadu dávky v tkáni v pozici čipového modulu včetně jednotky a nejistoty

Ing. Daniela Ekendahl
vedoucí Oddělení dozimetrie

Datum:

Podpis: