



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra mikroelektroniky**

**Studium vlastností optických vláken vystavených gama záření**

**Properties Study of the Optical Fibers Exposed to Gamma Radiation**

Bakalářská práce

**Lenka Benková**

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Prajzler Ph.D.



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Benková** Jméno: **Lenka** Osobní číslo: **452765**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Studium vlastností optických vláken vystavených gama záření**

Název bakalářské práce anglicky:

**Properties Study of the Optical Fibers Exposed to Gamma Radiation**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s teoretickými principy vedení světla v optických vláknových vlnovodech.
- 2) Seznamte se s měřicími metodami používanými pro diagnostiku optických vláken.
- 3) Podílejte se na testech optických vláknových vlnovodů a ozařování vlnovodů pomocí gama záření.
- 4) Proveďte měření vlastností optických vláken vystavených gama záření.
- 5) Dosažené výsledky shrňte do zprávy v rozsahu 15-20 stran.

Seznam doporučené literatury:

1. K. Novotný: Optická telekomunikační technika, ČVUT 1998, skripta.
2. L. Boháč, M. Lucky: Optické komunikační systémy, skripta ČVUT 2010.
3. M. Filka, Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Brno 2009. ISBN: 978-80-86785-14-1.
4. C. DeCusatis, Handbook of Fiber Optic Data Communication: A Practical Guide to Optical Networking. Burlington: Elsevier, 2008. ISBN: 978-0-12-374216-2.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **13.08.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.02.2023**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Václav Prajzler, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky



## **Poděkování**

Poděkování patří především vedoucímu práce doc. Ing. Václavu Prajzlerovi Ph.D. za cenné rady a konzultace.

Dále bych chtěla poděkovat vedoucímu oddělení Radiační chemie a kvalifikace na prostředí Ing. Vítu Plačkovi (ÚJV Řež, a. s.) za umožnění provedení testů pomocí gama ozařování v ozařovně PANOZA a Ing. Martinu Cabalkovi, za technickou pomoc při prováděných experimentech na pracovišti ÚJV Řež, a. s.

Na závěr bych ráda poděkovala firmě OPTOKON a.s. za poskytnutí optických vláken k prováděným experimentům.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 9.12.2020

.....

Benková Lenka

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá studiem vlivu záření gama na útlum jednovidových optických vláken. Zkoumány byly tři typy jednovidových optických vláken (G.652.D, G.657.A1/II a G.657.A1) délky 50 m. Tato optická vlákna byla postupně ozařována dávkami záření gama 33,5; 60,7; 100,5 a 170,4 kGy, kde jako zdroj záření byl použit panoramatický ozařovač  $^{60}\text{Co}$ .

Měření optického útlumu bylo provedeno na čtyřech vlnových délkách 1310, 1550, 1490 a 1625 nm s využitím měřicího přístroje OPTOKON OFT-4212. Nejprve byl změřen optický útlum vláken před ozařováním (tyto hodnoty byly použity jako referenční) a potom následovalo měření po ozáření. Byla změřena hodnota 1. den po ukončení ozařování, přičemž naměřené optické útlumy vláken dosahovaly po ukončení ozařování nejvyšších hodnot. Optické útlumy ozářených vláken se pohybovaly v rozmezí -1,3 až -3,8 dB v závislosti na typu vlákna, vlnové délce a aplikované dávce záření gama. Měření prokázalo, že optický útlum vláken se zvyšuje s rostoucí dávkou záření gama, a tedy nejvyšší optické útlumy byly naměřené pro nejvyšší ozařovací dávku 170,4 kGy. Pro vlnovou délku 1310 nm byly tyto optické útlumy -2,2 dB (vlákno 1), -2,4 dB (vlákno 2) a -2,0 dB (vlákno 3). Na vlnové délce 1550 nm byly tyto útlumy -3,4 dB (vlákno 1), -3,2 dB (vlákno 2) a -3,1 dB (vlákno 3).

Následně měření pokračovalo dalších 35 dní, kdy v průběhu tohoto měření byl sledován proces relaxace, tedy snižování optického útlumu. Cílem bylo zjistit kdy optický útlum měřených vláken přestane klesat. Měření ukázalo, že klesání optického útlumu nastane přibližně mezi 15 až 25 dnem po ukončení ozařování a závisí na vlnové délce a ozařovací dávce. Po ozáření vyšší ozařovací dávkou probíhá relaxace vlákna déle.

Další měření jsem provedla pomocí spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C ve spektrálním rozsahu 600 až 1700 nm a z výsledků tohoto měření lze pozorovat nárůst optického útlumu s rostoucí vlnovou délkou. Posledním měřením bylo měření zpětného rozptylu metodou OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) na přístroji OPTOKON MOT-940 Mini OTDR na vlnových délkách 1310, 1550 a 1625 nm. Dosažené výsledky jsou srovnatelné s naměřenými hodnotami na přístroji OPTOKON OFT-4212. Kromě měření byl také proveden teoretický výpočet optického útlumu vláken v případě, že by vlákna byla ozářena vyššími dávkami záření (500, 1000, 1500 a 2000 kGy).

**Klíčová slova:** Optická vlákna, Jednovidová optická vlákna, Optický útlum, Záření gama, Relaxace optických vláken

## Abstract

This bachelor thesis describes gamma radiation impact on attenuation loss to single mode optical fibers. All measured types of single mode optical fibers (G.652.D, G.657.A1/II a G.657.A1) in this research had a length of 50 meters. Optical fibers were consequently irradiated by gamma ray doses 33,5; 60,7; 100,5 and 170,4 kGy with the main radiation panoramic source  $^{60}\text{Co}$ .

Attenuation loss measurements were executed in four wavelengths, 1310, 1550, 1490 and 1625 nm, using the OPTOKON OFT-4212 device. Any gamma ray attenuation loss meterings were preceded by the reference measurement. This was executed on the optical fibers with no previous gamma ray irradiation. One day after irradiation, values were measured at the point where attenuation loss values reached their peak values. Attenuation loss of examined optical fibers varied in the range of -1,3 to -3,8 dB, depending on the fiber type, gamma ray length and irradiation strength. Executed test results prove that attenuation loss of optical fibers increases in parallel with growing radiation dose and therefore most loss was measured for the highest radiation dose 170,4 kGy. Following attenuation loss were measured for wavelength 1310 nm: -2,2 dB (fiber 1), -2,4 dB (fiber 2), -2,0 (fiber 3). Another measurement on wavelength 1550 nm provided results: -3,4 dB (fiber 1), -3,2 dB (fiber 2), -3,1 (fiber 3).

Measurements continued in the 35 days period since the first optical fiber gamma irradiation, focusing mainly on the relaxation process of attenuation loss. Main goal of this part of research was to find the point where the fiber attenuation loss stops further decreasing. Test results show us that attenuation loss decline stops approximately between 17 and 25 days after the gamma irradiation. This depends on the wavelength and radiation dose. The higher the radiation dose the longer the length of the relaxing process.

Further measurements were executed with spectral analyzer device YOKOGAWA AQ6370C in the spectral range from 600 to 1700 nm and resulted in the conclusion that attenuation loss increases with increasing wavelength. Measurement of back scattering executed with OTDR method (Optical Time-Domain Reflectometry) on OPTOKON MOT-940 Mini OTDR device and wavelengths 1310, 1550 1625 nm, reported similar measurement values as the test made by OPTOKON OFT-4212. Beside the executed measurements, theoretical calculation of attenuation loss was made for higher radiation doses (500, 1000, 1500 a 2000 kGy).

**Key words:** Optical fibers, Single mode optical fibers, Attenuation loss, Gamma radiation, Relaxation of optical fibers.



## Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Jednotka	Význam
$\theta_m$	rad	Mezní úhel
$n_1$	-	Index lomu jádra
$n_2$	-	Index lomu pláště
$u$	dB	Optický útlum
$\lambda$	nm	Vlnová délka
$P_1$	W	Vstupní výkon
$P_2$	W	Výstupní výkon
$\alpha$	dB · km <sup>-1</sup>	Měrný útlum
$l$	m	Délka
$P_{\text{celk}}$	dB	Celkové ztráty mezi zdrojem a detektorem.
$\alpha_v$	dB	Ztráty vlákna a svarů
$P_D$	dBm	Minimální optický výkon, který musí dopadat na detektor.
$P_1$	dBm	Výkon navázaný do vlákna
$L$	m	Délka trasy
$P_k$	dB	Výkonová rezerva
$n$	-	Počet konektorů

## Obsah

1. Úvod.....	9
2. Optické vláknové vlnovody .....	10
3. Optický komunikační systém.....	15
4. Záření gama .....	18
5. Použité měřicí metody .....	21
5.1. Přímá metoda OFT-4212 .....	21
5.2. Měření spektrálních charakteristik .....	23
5.3. Metoda zpětného rozptylu (OTDR).....	24
5.4. Optická kvalita čel vláken .....	25
5.5. Popis měřených vláknových vlnovodů.....	25
6. Výsledky měření .....	27
6.1. Výsledky měření přímou metodou – OFT-4212 .....	27
6.2. Spektrální charakteristiky .....	41
6.3. Výsledky měření metodou zpětného rozptylu (OTDR) .....	46
7. Závěr .....	51
8. Použitá literatura .....	53
9. Přílohy.....	55

# 1. Úvod

V současnosti se pro přenos signálů v telekomunikacích používají optická vlákna, která můžeme rozdělit na jednovidová (SM – singlemode), s typickým průměrem jádra 4-9  $\mu\text{m}$  a průměrem pláště 125  $\mu\text{m}$  a mnohovidová (MM – multimode) s průměrem jádra 50  $\mu\text{m}$  nebo 62,5  $\mu\text{m}$  a průměrem pláště 125  $\mu\text{m}$ . Jednovidová vlákna jsou používána k přenosům na dlouhé vzdálenosti a využívají se vlnové délky 1310 a 1550 nm. Na vlnové délce 1310 nm mají křemenná optická vlákna nejnižší disperzi a vlnová délka 1550 nm je používána z důvodu, že křemenná optická vlákna mají na této vlnové délce nízký optický útlum. Mnohovidová vlákna se naopak využívají hlavně pro přenos na kratší vzdálenosti vzhledem k tomu, že na delší trasy mají méně uspokojivé disperzní vlastnosti než jednovidová vlákna. Typické vlnové délky používané pro přenos signálu pomocí mnohovidových vláken jsou 850 nebo 1300 nm.

V této bakalářské práci se zabývám studiem vlastností jednovidových vláken pro použití v extrémním prostředí (harsh environment). Konkrétně se jedná o měření optického útlumu vláken, která jsou vystavena po delší dobu dávce záření gama. Vlivem gama záření dochází ke zvýšení optického útlumu. Tento proces se označuje jako tzv. „slepnutí“. Příčinou jsou především změny ve struktuře skla v důsledku působení vysoce energetických fotonů záření gama. Po ozáření jsou vlákna také ovlivněna procesem relaxace, při kterém dochází v průběhu několika dní po ukončení ozařování k poklesu hodnot optického útlumu [1].

Cílem této práce bylo sledovat vliv záření gama a relaxace na optický útlum jednovidových vláken. Získané výsledky by měli sloužit k ověření, zda je možné používat optická vlákna pro přenos dat v případě, že budou tyto vlákna vystavena gama záření. Především se jedná o aplikace v optických komunikacích jaderných elektráren, ve farmaci, vesmírném výzkumu apod.

## 2. Optické vláknové vlnovody

Optické vláknové vlnovody neboli optická vlákna jsou dielektrické struktury sloužící k přenosu informací ve formě elektromagnetického vlnění na velké vzdálenosti. Každé optické vlákno se skládá ze dvou základních částí – jádra a pláště. Optická vlákna lze rozdělit na dva základní typy podle způsobu vedení vln. Prvním typem je takzvaný step-index (SI). Jádra SI vláken jsou homogenní a vedení vln v tomto typu vláken funguje na principu totálního odrazu, který nastává na rozhraní jádro-plášť. Totální odraz nastane, pokud platí následující vztah, který plyne ze Snellových zákonů pro odraz a lom na rozhraní dvou prostředí [2, 3]:

$$\theta_m > \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1)$$

$\theta_m$  – mezní úhel [rad]

$n_1$  – index lomu jádra [-]

$n_2$  – index lomu pláště [-]

Ze vztahu je patrné, že index lomu jádra musí být vyšší než index lomu pláště. Druhým typem jsou vlákna typu gradient-index (GRIN). Tento typ vláken má nehomogenní jádro a index lomu je závislý na poloměru daného vlnovodu. V případě vláken typu GRIN je principem vedení ohyb. Toho se využívá ve vícevidových vláknech, kde je potřeba co nejvíce vyrovnat skupinovou rychlost šíření jednotlivých vidů, aby došlo k co největšímu potlačení vidové disperze [2, 3].

### Ztráty ve vlnovodech

Každý reálný vlnovod vykazuje určité ztráty. Se zvětšující se vzdáleností od zdroje dochází vlivem ztrát k poklesu přenášeného výkonu. Ztráty ve vlnovodech jsou způsobeny především absorpcí a rozptylem. K absorpci může docházet v oxidu křemičitém ( $\text{SiO}_2$ ), který má dva absorpční pásy. Jeden z těchto pásů leží v ultrafialové oblasti a druhý v infračervené oblasti. Příčinou absorpčních ztrát jsou především OH ionty. Tyto se objevují poblíž přenosových oken, kde jsou pozorovatelné jako lokální maxima útlumu. Ztráty absorpcí způsobují také různé typy příměsí, které se využívají například k úpravě indexu lomu jádra nebo nečistoty ve formě kationtů kovů ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^+$ ,  $\text{Mn}^{3+}$  apod.). Významným faktorem z hlediska ztrát optických vláken je Rayleighův rozptyl. Ten má původ ve struktuře samotného vlákna, kde dochází k náhodným lokálním změnám hustoty a pokud jsou tyto změny menší, než je vlnová délka záření dochází k rozptylu. Může se stát, že se ve vlákně objeví nehomogenity, které jsou větší nebo srovnatelné s vlnovou délkou záření a v tomto případě dochází k Mieho rozptylu. Další příčiny ztrát jsou ohyby a mikroohyby. Může k nim docházet při výrobě nebo také při provozu vláken. Pokud jsou vlákna propojena je nutné uvažovat i ztráty na konektorech a spojkách [2].

K vyjádření celkových ztrát optického vlákna byla zavedena veličina optický útlum. Je definován jako poměr výkonu přivedeného na vstup vlákna a výstupního

výkonu pro konkrétní vlnovou délku. Kromě optického útlumu se používá také veličina měrný útlum, která vyjadřuje optický útlum na jednotku délky.

### Vztah pro optický útlum:

$$u(\lambda) = 10 \cdot \log \left( \frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2)$$

$u(\lambda)$  – optický útlum [dB]

$\lambda$  – vlnová délka [nm]

$P_1$  – vstupní výkon [W]

$P_2$  – výstupní výkon [W]

### Vztah pro měrný optický útlum:

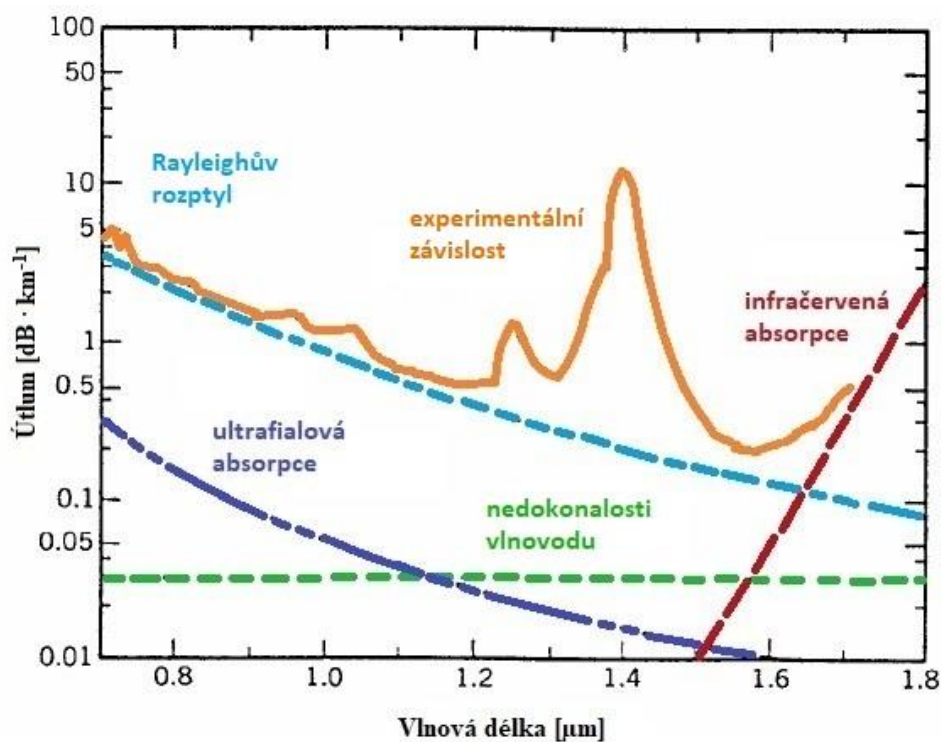
$$\alpha(\lambda) = \frac{u(\lambda)}{l} \quad (3)$$

$\alpha(\lambda)$  – měrný útlum [dB · km<sup>-1</sup>]

$u(\lambda)$  – optický útlum [dB]

$l$  – délka [km]

Závislost útlumu SiO<sub>2</sub> vlákna na vlnové délce a vliv různých ztrát lze pozorovat na obrázku 1.



Obrázek 1: Ztráty v optických vláknech [4].

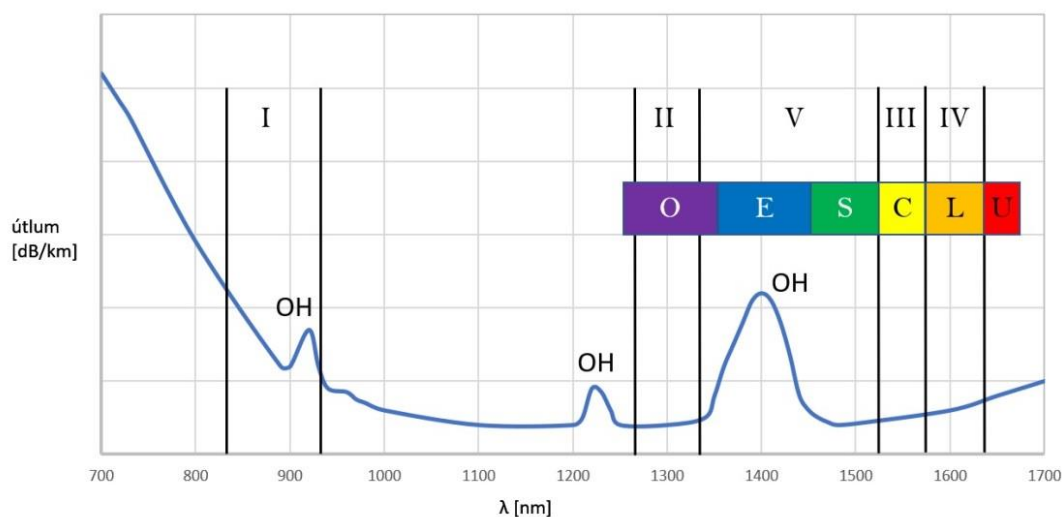
## Optická komunikační okna

Pro přenosy v optických vláknech se využívají tzv. komunikační okna. Celkem je jich 5 a každé z nich má výhodné přenosové vlastnosti z hlediska útlumu nebo disperze (viz tabulka 1).

**Tabulka 1:** Komunikační okna a jejich využití [5].

Komunikační okno	Vlnová délka [nm]	využití
I.	850	Typické pro MM vlákna a přenosy na krátké vzdálenosti
II.	1280–1335	SM vlákna – dálkové přenosy, důležitá vlnová délka 1310 nm – nízká disperze. MM vlákna – vlnová délka 1300 nm.
III.	1530-1565	SM vlákna a přenosy na vlnové délce 1550 nm – nízký optický útlum
IV.	1565-1625	Velmi podobné útlumové vlastnosti jako 3. okno
V.	1335-1530	V minulosti nevhodné k přenosu, protože na vlnové délce 1380 nm je vysoká OH absorpce. Koncem 90. let se ji povedlo úspěšně eliminovat na přijatelnou úroveň.

Jednotlivá přenosová okna jsou součástí útlumové charakteristiky a jsou uvedena na obr.2. Bylo také zavedeno nové značení přenosových pásem uvedené v tabulce 2.



**Obrázek 2:** Útlumová charakteristika optického vlákna [6].

**Tabulka 2:** Značení přenosových pásem [5].

Pásmo	Název	Vlnová délka [nm]
O	Original	1260-1360
E	Extended	1360-1460
S	Short	1460-1530
C	Conventional	1530-1565
L	Long	1565-1625
U	Ultra-long	1625-1675

### Standardy pro optická vlákna

Původní dělení optických vláken vycházelo z geometrie jádra a pláště. Nově bylo zavedeno dělení podle standardů OM1, OM2, OM3, OM4 a OM5 pro vícevidová vlákna a OS1, OS2 pro jednovidová vlákna. Základní rozdíly v přenosových rychlostech a maximální dosažitelné vzdálenosti pro MM vlákna jsou uvedeny v tabulce 3. Základní rozdíly ve standardech pro SM vlákna jsou popsány v tabulce 4. Tabulka 5 popisuje některé vlastnosti ITU-T standardů SM vláken měřených v této bakalářské práci.

**Tabulka 3:** Maximální dosažitelné vzdálenosti použití MM vláken pro různé přenosové rychlosti [7].

Standard	OM1	OM2	OM3	OM4	OM5
Max. přenosová rychlost	Max. dosažitelná vzdálenost				
1 Gigabit	257 m	550 m	550 m	550 m	550 m
10 Gigabit	33 m	82 m	300 m	550 m	550 m
40 Gigabit	-	-	100 m	150 m	150 m
100 Gigabit	-	-	70 m	150 m	150 m

**Tabulka 4:** Základní rozdíly mezi standardy SM vláken OS1 a OS2 [8].

Standard	OS1	OS2
ITU-T standard	G.652.A/B/C/D	G.652.C/G.657.A1
Konstrukce kabelu	Tight Buffer	Loose tube
Aplikace	Vnitřní kabeláž	Venkovní kabeláž
Maximální optický útlum pro 1310 a 1550 nm	1 dB/km	0,4 dB/km
Max. vzdálenost	10 km	200 km
Max. přenosová rychlost	10 Gbit	40-100 Gbit

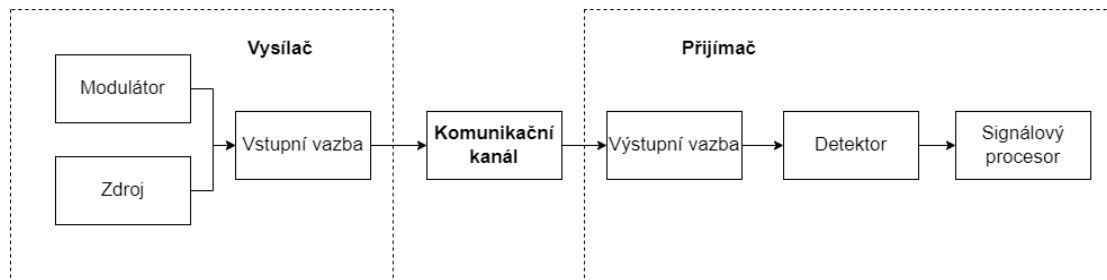
**Tabulka 5:** Vybrané vlastnosti měřených optických vláken (viz. příloha A,B a C).

	G.652.D	G.657.A1	G.657.A1/II
Průměr vidového pole na 1310 nm	$9,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$	$8,9 \pm 0,4 \mu\text{m}$	$9,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$
Průměr vidového pole na 1550 nm	$10,4 \pm 0,5 \mu\text{m}$	-	$10,4 \pm 0,5 \mu\text{m}$
Průměr pláště	$125,0 \pm 0,7 \mu\text{m}$		
Nekruhovost pláště	$\leq 0,7\%$		
Optický útlum na 1310 nm (typický/maximální) – Loose tube	0,32 / 0,4 dB/km		
Optický útlum na 1550 nm (typický/maximální) – Loose tube	0,20 / 0,4 dB/km		
Optický útlum na 1625 nm (typický/maximální) – Loose tube	0,21 / 0,4 dB/km		
Optický útlum na 1310 nm (typický/maximální) – Tight buffered	0,33 / 0,4 dB/km		
Optický útlum na 1550 nm (typický/maximální) – Tight buffered	0,25 / 0,4 dB/km		



### 3. Optický komunikační systém

Komunikační systémy slouží k přenosu informací ve formě elektromagnetických vln. Jednoduchý optický komunikační systém se skládá z vysílače, komunikačního kanálu a přijímače. Informace ve formě elektrického signálu, kterou potřebujeme odeslat z jednoho místa na druhé, je v takovémto systému namodulována na elektromagnetickou vlnu. Tato vlna slouží jako nosič a transportuje informaci s využitím komunikačního kanálu k přijímači. Přijímač zachytí elektromagnetickou vlnu a demoduluje přenášenou informaci zpátky na elektrický signál [3].



**Obrázek 3:** Blokové schéma optického komunikačního systému [3].

Mezi hlavní parametry komunikačních systémů patří přenosová kapacita a s ní související šířka pásma nebo přenosová rychlost. Jsou ovlivňovány především kmitočtem nosné vlny ale také zvolenými součástkami a šumem. Proto při návrhu komunikačního systému hraje důležitou roli výběr správných komponent. Při výběru vhodného vysílače je důležitý jeho výkon. Nejčastěji se uvádí v jednotkách W nebo dBm (výkon vztažený k jednomu mW). U digitálních systému se sleduje doba náběhu, u analogových mezní kmitočty. Další důležité parametry jsou vlnová délka a šířka spektra. Jako zdroje záření se používají LED nebo LD diody. V případě zdrojů je cílem, aby se reálné zdroje vlastnostmi co nejvíce blížili ideálním zdrojům, které jsou monochromatické (s konstantním výkonem). Komunikační kanál, který slouží k propojení vysílače a přijímače je reprezentován optickým vláknem. Lze zvolit mezi dvěma typy vláken, a to SM (singlemode – jednovidové) nebo MM (multimode – mnohovidové). Mezi základní parametry při výběru optického vlákna patří index lomu, rozměry, útlum a disperze. K propojení vysílače s komunikačním kanálem slouží vstupní vazba, která je závislá na numerické apertuře daného vlákna. Numerická apertura určuje úhel, pod kterým můžeme do vlákna svítit tak aby se výkon do vlákna správně navázal. Výstupní vazba slouží k propojení vlákna s přijímačem. Jako přijímače se používají detektory záření ve formě fotodiod. Sledované vlastnosti jsou spektrální citlivost a doba náběhu. Při přenosu je signál ovlivňován útlumem, disperzí a šumem proto je součástí přijímače také signálový procesor, jehož úkolem je opravit deformovaný signál [3].

Samotný návrh přenosové soustavy se skládá ze dvou částí:

- Bilance energie optické trasy
- Bilance zpoždění (doby náběhu)

Vzhledem k tomu, že se v mojí práci nezabývám disperzními vlastnostmi optických vláken a bilance zpoždění s disperzí úzce souvisí, bude výpočet zaměřen pouze na bilanci energii optické trasy. Nejdříve je ale nutné zvolit vhodné komponenty, vlnovou délku a požadovanou délku přenosu.

## Volba komponent

Tento výpočet provedu pro délky spoje 100, 500, 1000, 5000 a 10000 m s využitím jednovidového optického vlákna. Výběr zdroj záření souvisí s volbou vlnové délky. Pro nejběžnější vlnové délky 1310 a 1550 nm je vhodná LD dioda, protože má úzkou šířku spektrální čáry, která značí menší vliv chromatické disperze a větší přenosovou rychlost než LED. V případě detektoru uvažuji lavinovou fotodiodu z důvodu vysoké citlivosti. Zvolené komponenty a parametry pro tento systém jsou uvedeny v tabulce 6.

**Tabulka 6:** Parametry komunikačního systému.

Typ vlákna	Jednovidové (SM)
Délka spoje l [m]	100, 500, 1000, 2000, 5000, 10000
Vlnová délka [nm]	1310, 1550
Zdroj záření	LD InGaAsP
Detektor	APD InGaAs

## Bilance energie optické trasy

Při přenosu signálu jsou hlavními zdroji ztrát především vstupní vazba, konektory, svary, vlákno a výstupní vazba. Přenos mohou ovlivňovat také změny teplot, vlhkost, mechanické poškození a náhrady těchto komponent apod. Je proto vhodné uvažovat určitou výkonovou rezervu. Pro výpočet použijeme následující označení [3]:

$P_{celk}$  – celkové ztráty mezi zdrojem a detektorem.

$\alpha_v$  – ztráty vlákna a svarů

$P_D$  – minimální optický výkon, který musí dopadat na detektor.

$P_1$  – výkon navázaný do vlákna

$P_r$  – výkonová rezerva

Vstupní ztráty respektujeme volbou minimálního vstupního výkonu navázaného do vlákna.

Výstupní vazební ztráty zanedbáme.

Pro přenášený výkon musí platit:

$$P_1 - P_D = P_{celk} + P_r \quad (4)$$

Pro maximální přípustné ztráty:

$$P_{celk} = P_1 - P_D - P_r \quad (5)$$

Dále můžeme vztah rozepsat:

$$nP_k + L\alpha_v + P_r = P_1 - P_D \quad (6)$$

kde  $n$  je počet konektorů,  $L$  značí celkovou délku trasy a  $P_k$  jsou ztráty na konektorech.

Cílem tohoto výpočtu je tedy odhadnout celkové ztráty mezi zdrojem a detektorem (značeno  $P_{celk}$ ). Hodnoty zvolené pro výpočet jsou obsaženy v tabulce 7. Všechny hodnoty kromě minimálního optického výkonu, který musí dopadat na detektor (značeno  $P_D$ ) jsou konstantní. Hodnotu  $P_D$  budu měnit v závislosti na zvolené délce trasy.

**Tabulka 7:** Parametry pro výpočet.

Parametr	Hodnota
$\alpha_v$ [dB · km <sup>-1</sup> ]	0,4
$P_D$ [μW]	?
$P_1$ [mW]	1 (0 dBm)
$P_r$ [dB]	5
$P_k$ [dB]	1
$n$ [-]	2
$l$ [m]	100, 500, 1000, 2000, 5000, 10000

Ukázkový výpočet bude proveden pro hodnoty uvedené v tabulce 7 a délku trasy 100 m.

Nejprve vypočítám, jaký minimální optický výkon musí dopadat na detektor, pokud zvolená výkonová rezerva systému je 5 dB. Po dosazení do rovnice (6) získáme:

$$2 \cdot 1 + 0,1 \cdot 0,4 + 5 = 0 - P_D$$

$$P_D = -7,04 \text{ dBm}$$

Minimální výkon, který musí dopadat na detektor pro délku trasy 100 m a pro zvolené parametry z tabulky 7 je tedy -7,04 dBm což odpovídá přibližně 198 μW a po dosazení do rovnice (5) získáme celkové ztráty tohoto systému:

$$P_{celk} = 0 - (-7,04) - 5 = -2,04 \text{ dB}$$

Pro dané parametry jsou tedy celkové ztráty systému -2,04 dB.

**Tabulka 8:** Vypočítané hodnoty celkových ztrát.

Délka trasy [km]	Minimální výkon dopadající na detektor [dBm]	Minimální výkon dopadající na detektor [μW]	Celkové ztráty [dB]
0,1	-7,04	198	2,04
0,5	-7,20	191	2,20
1	-7,40	182	2,40
2	-7,80	166	2,80
5	-9,00	126	4,00
10	-11,00	79	6,00

Vzhledem ke zvoleným parametrům nemusí bilance energie optické trasy odpovídat reálnému systému. S výsledky tohoto výpočtu budu pracovat dále v kapitole výsledky měření.

## 4. Záření gama

Vznik záření gama je úzce spojen s radioaktivním rozkladem atomových jader, při kterém je emitováno ve formě kvant. Jedná se o vysokoenergetické záření a patří tedy do skupiny ionizujících záření. Charakteristickými vlastnostmi tohoto záření jsou krátká vlnová délka, vysoká frekvence a pronikavost. Často se značí řeckým písmenem „ $\gamma$ “ [9].

### Dozimetrické veličiny

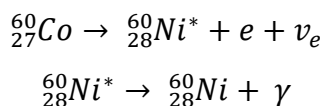
Důležitou veličinou je absorbovaná dávka. Značí se  $D$  a je definována jako energie předaná látce ionizujícím zářením vztažená na hmotnost. Jednotkou je Gray a značí se Gy. Další důležitou veličinou je dávkový příkon, který charakterizuje přírůstek dávky za čas. Jednotkou je  $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$  [10].

### Vliv záření gama na optická vlákna

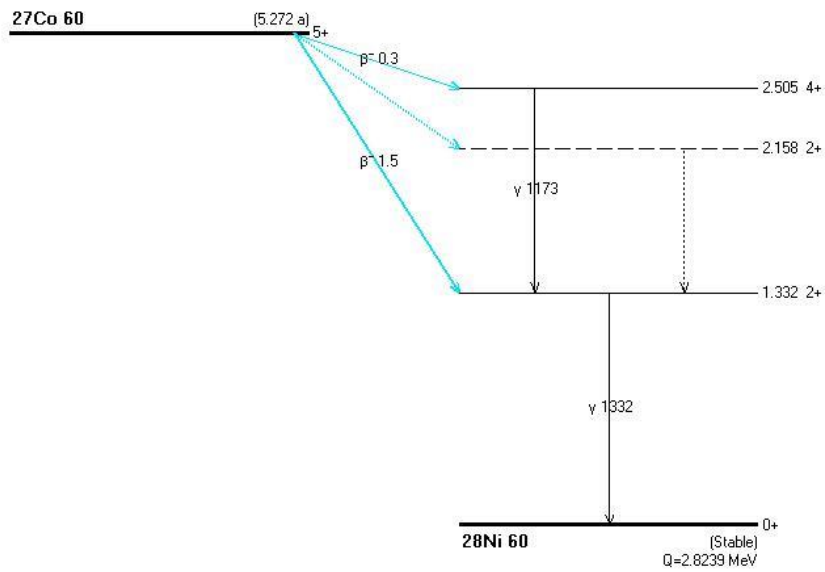
Vlivem ozařování vznikají změny ve vnitřní struktuře optických vláken. Fotony způsobují ionizaci elektronů, které mohou být zachyceny v mřížce a zapříčinit různé defekty. V důsledku přemístování atomů, iontů a elektronů dochází také ke změně absorpčních vlastností optického vlákna. Sklo po ozáření ztmavne a dojde k zvýšení optického útlumu. Při vysokých dávkách může dojít i k úplné ztrátě funkce [1].

### Ozařování vzorků

Ozařování vzorků bylo realizováno ve spolupráci s pracovištěm ÚJV Řež, oddělení Radiační chemie a kvalifikace na prostředí s využitím panoramatické ozařovny. Tato ozařovna umožňuje ozařování v plné geometrii. Jako zářič byl použit tyčový zdroj  $^{60}\text{Co}$ , v kovovém stavu o aktivitě cca 100 TBq ke dni přebití (přebitím je myšleno jeho sestavení a zavaření do obalového souboru). Radionuklid  $^{60}\text{Co}$  má poločas rozpadu 5,27 let a gama záření je z něj emitováno na základě reakcí [11]:

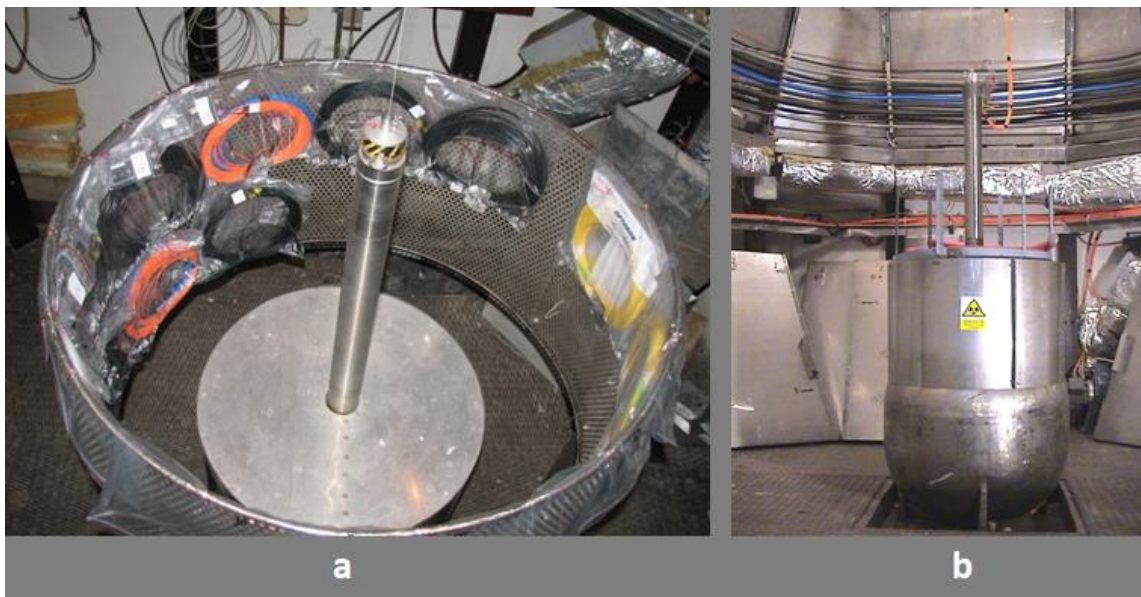


Z první rovnice je patrné, že nejprve dojde k vyzáření elektronu (částice beta-) a elektronového neutrina za vzniku jádra niklu v excitovaném stavu. Z druhé rovnice plyne, že excitované jádro vyzáří přebytečnou energii (1,17 MeV nebo 1,33 MeV viz. obr. 5) ve formě kvant gama záření. Průměrná energie záření  $\gamma$  z diskrétního spektra  $^{60}\text{Co}$  je 1,25 MeV, to znamená, že nemůže dojít k vyvolání radioaktivity u zkušebních předmětů [11].



**Obrázek 4:** Vyzářená energie při rozkladu  $^{60}\text{Co}$  [11].

Na obrázku 5 jsou dvě fotografie z ozařovny. Na obr. 5 a) jsou vzorky optických vláken umístěné po obvodu ozařovače připravené k ozáření a na obr. 5 b) je fotografie ozařovače po umístění ochranného krytu.



**Obrázek 5:** a) – Fotografie z ozařovny s umístěním vzorků po obvodu ozařovače, b) – fotografie ozařovače po umístění ochranného krytu [11].

Ozařování optických vláken proběhlo pro čtyři ozařovací dávky viz. tabulka 9.

**Tabulka 9:** Dávky ozáření vzorků při jednotlivých fázích a doba expozice.

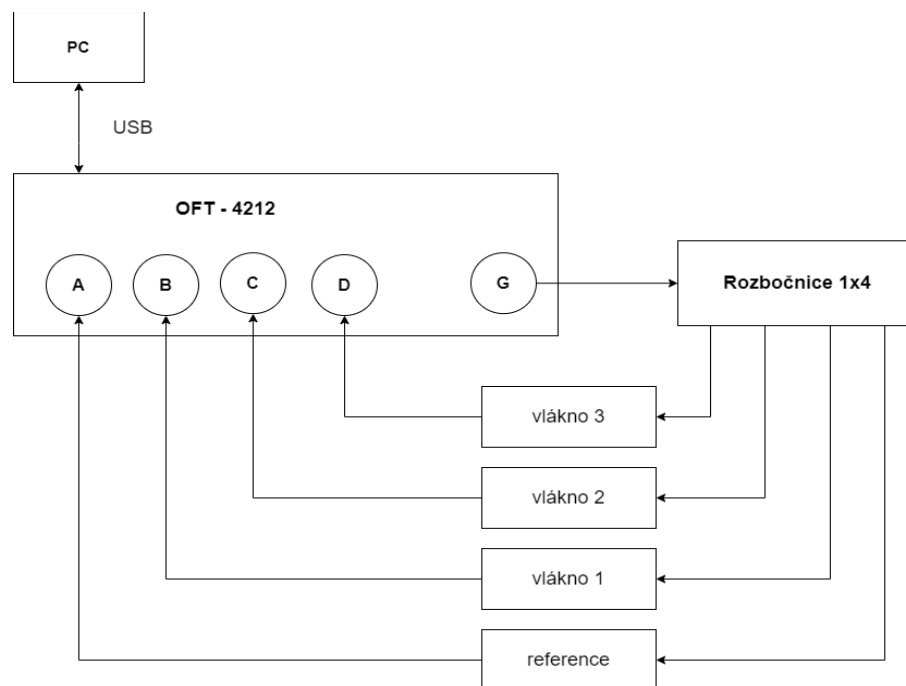
Ozařování	Přesná dávka [kGy]	Průměrný dávkový příkon [Gy · h <sup>-1</sup> ]	Doba expozice [den]
1	33,5 ± 3,2	66,6	21
2	60,7 ± 5,7	65,6	38
3	100,5 ± 9,4	62,5	64
4	170,4 ± 16,0	63,4	120

## 5. Použité měřicí metody

Tato kapitola popisuje použité měřicí metody. Pro měření optického útlumu jsem používala čtyřkanálový přístroj OPTOKON OFT-4212. Spektrální charakteristiky jsem měřila pomocí analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C a metoda zpětného rozptylu OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) byla realizována pomocí přístroje OPTOKON MOT-940 Mini OTDR.

### 5.1. Přímá metoda OFT-4212

Pro měření přímou metodou byl použit přístroj OPTOKON OFT-4212 jedná se o čtyřkanálový měřicí přístroj, který slouží k měření útlumu optických vláken. Přístroj je vybaven optickými zdroji, které pracují na vlnových délkách 1310, 1490, 1550 a 1625 nm s dynamickým rozsahem -65 dBm až +10 dBm a jsou pomocí optického přepínače připojeny do výstupního konektoru FC/PC. Na tento konektor je připojena rozbočnice 1x4 (OPTOKON SFT-P-01x04 CM3-UPC-NPC), která je při kalibraci připojena do čtyř vstupních detektorů označených A, B, C, D. Při měření jsou na tuto rozbočnici připojena měřená optická vlákna pomocí PC/APC spojek. Schéma zapojení je uvedeno na obrázku 6. Měření je prováděno pomocí řídicího PC v programu OPM (Optical Power Monitor v1.1).



**Obrázek 6:** Schéma zapojení OFT-4212. Kanál G značí výstupní konektor připojený k optickým zdrojům. Kanály A, B, C, D jsou vstupní konektory, pomocí kterých jsou měřená vlákna připojena k detektorům.

Postup měření: nejprve bylo provedeno několik referenčních měření, kde byla vlákna připojena na jednotlivé kanály podle tabulky 10. Pole obsahující symbol „ - “ značí, že na daný detektor byla připojena pouze rozbočnice.

**Tabulka 10:** Zapojení vláken na jednotlivé detektory měřicího přístroje.

Měření	Kanál detektoru			
	A	B	C	D
1	1REF	1OZ1	1OZ2	-
2	2REF	2OZ1	2OZ2	-
3	3REF	3OZ1	3OZ2	-
4	-	1OZ3	2OZ3	3OZ3
5	-	1OZ4	2OZ4	3OZ4

Po ozařování byla vlákna připojena na detektory přístroje podle tabulky 11.

**Tabulka 11:** Zapojení měření na detektory měřicího přístroje pro jednotlivé ozařovací dávky.

Ozařovací dávka [kGy]	Kanál detektoru			
	A	B	C	D
33,5	1REF	1OZ1	2OZ1	3OZ1
60,7	2REF	1OZ2	2OZ2	3OZ2
100,5	1REF	1OZ3	2OZ3	3OZ3
170,4	1REF	1OZ4	2OZ4	3OZ4

Na obrázku 7 je uvedena fotografie pracoviště se vzorky připojenými k měřicím přístrojům. Na fotografii jsou uvedeny dva přístroje OPTOKON OFT-4212 a dva řídicí PC. Přístroj OPTOKON OFT-4212 vlevo je určen pro měření SM vláken a přístroj vpravo pro měření MM vláken.

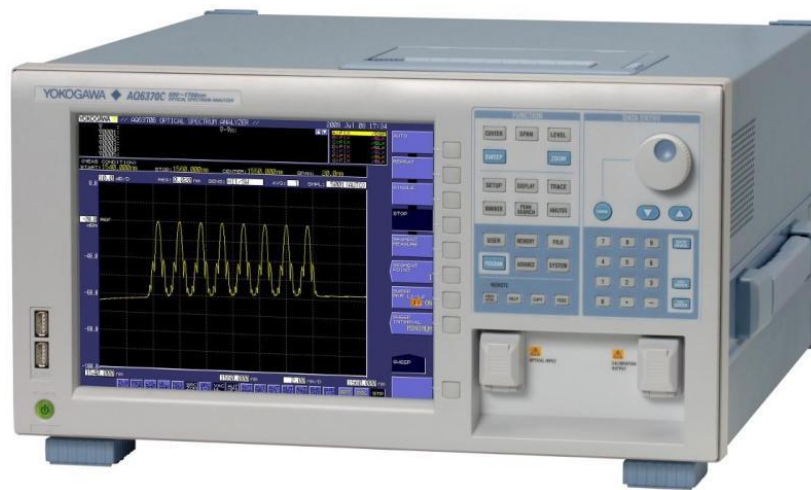


**Obrázek 7:** Fotografie měřicího pracoviště vybaveného zařízením OPTOKON OFT-4212. Vlevo pro měření SM vláken a vpravo pro měření MM vláken.

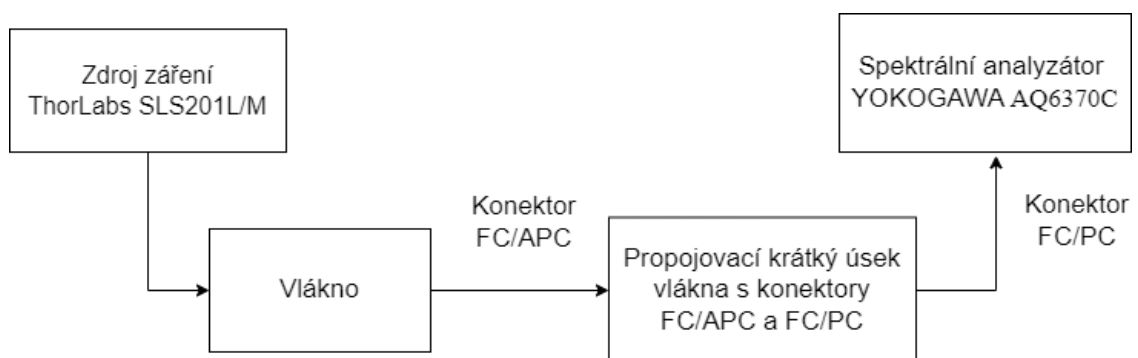


## 5.2. Měření spektrálních charakteristik

Pro měření spektrálních charakteristik jsem používala spektrální analyzátor YOKOGAWA AQ6370C (viz. obr. 8), který umožňuje měření ve spektrálním rozsahu 600-1700 nm. K měření byl využit širokospektrální zdroj záření ThorLabs SLS201L/M s rozsahem 360-2600 nm. Zapojení měření bylo realizováno podle schématu uvedeném na obrázku 9. Ke zdroji záření bylo připojeno měřené vlákno s konektory FC/APC. Na druhém konci bylo vlákno propojeno s hybridním propojovacím vláknem, které má na jedné straně konektor FC/APC a na druhé FC/PC, který byl připojen na kanál spektrálního analyzátoru.



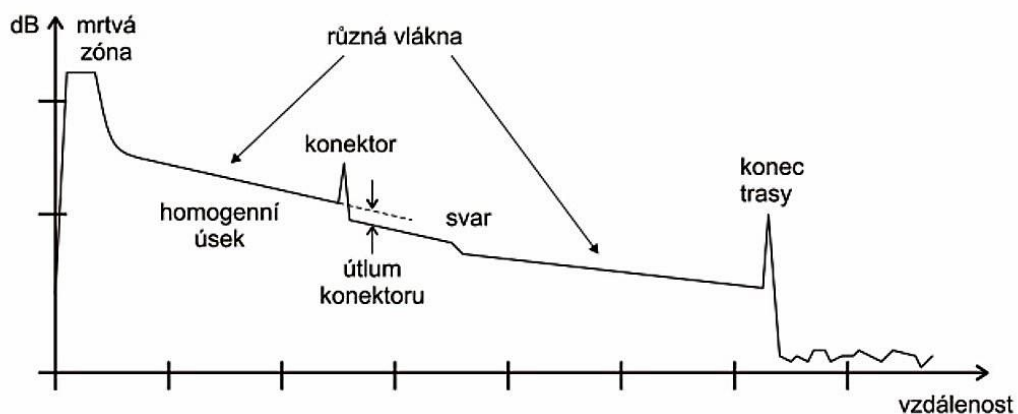
Obrázek 8: Spektrální analyzátor YOKOGAWA AQ6370C [13].



Obrázek 9: Zapojení pro měření spektrálních charakteristik.

### 5.3. Metoda zpětného rozptylu (OTDR)

Metoda zpětného rozptylu OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) je založena na principu detekce zpětně rozptýleného optického výkonu. Když se optickým vláknem šíří pulz část jeho energie se rozptyluje (Rayleighův rozptyl). Jistý podíl této rozptýlené energie se vrací zpět a tam je možné tuto energii detekovat. Pokud zaznameneáme časovou závislost této rozptýlené energie, můžeme vyhodnotit profil měřené optické trasy. Naměřená data jsou potom reprezentována charakteristickou křivkou podobnou té na obrázku 10. Na křivce lze pozorovat několik různých situací. Počáteční zákmit, označený jako mrtvá zóna, je způsoben dočasným přehlcením přijímače v důsledku Fresnelova odrazu na vstupu vlákna. K vyhodnocení výsledků měření se proto uvažuje až úsek křivky za mrtvou zónou. K podobnému odrazu dochází i na konci trasy a za tímto úsekem už pozorujeme pouze úroveň šumu. Mezi počátkem a koncem trasy je zobrazen menší zákmit a následný pokles útlumu, toto je způsobené například konektory. Poklesy útlumu bez zákmitů mohou být důsledkem svarů. Další možné pozorovatelné situace jsou mírné zvlnění nebo změna útlumu při zařazení vlákna s jinými vlastnostmi apod. Metoda zpětného rozptylu se často označuje i jako metoda optické reflektometrie v časové oblasti (Optical time-domain reflectometry neboli OTDR) [14, 15].



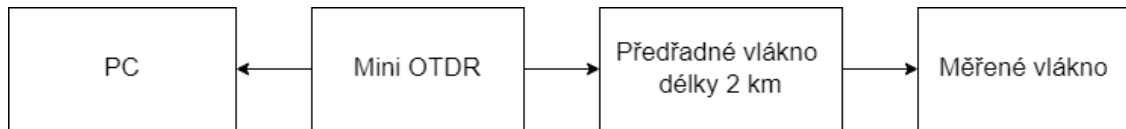
**Obrázek 10:** Příklad záznamu zpětného odrazu trasy pořízeného pomocí zařízení OTDR [14].

K měření jsem použila přístroj OPTOKON MOT-940 Mini OTDR (viz. obr. 11). Pro měření byl použit přístroj s možností měření SM vláken na třech vlnových délkách, a to 1310, 1550 a 1625 nm.



**Obrázek 11:** OPTOKON MOT-940 Mini OTDR [16].

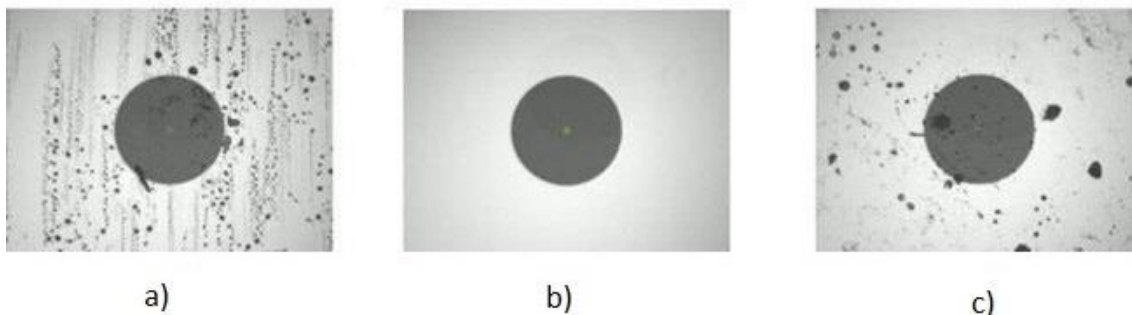
Zapojení měření bylo provedeno podle obrázku 12. Kde k přístroji MOT-940 Mini OTDR je připojeno předřadné vlákno o délce 2 km a na něj navazuje měřené vlákno s jedním volným koncem. Pomocí USB je přístroj propojen s počítačem kam se ukládají naměřená data.



**Obrázek 12:** Schéma měření používající zařízení OTDR.

## 5.4. Optická kvalita čel vláken

Při propojování jednovlákových optických vláken je velmi důležité udržovat čela optických vláken bez jakýchkoliv nečistot. Pro kontrolu jsem používala 400x Fiber microscope. Před každým zapojením měření byly konektory optických vláken vyčištěny a zkontrolovány mikroskopem, zda bylo čištění dostatečné a také jestli nejsou mechanicky poškozené. Příklady fotografií znečištěných čel optických vláken jsou uvedeny na obrázku 13.



**Obrázek 13:** a) znečištění oleji, b) čisté čelo, c) znečištění prachem [17].

V případě poškozeného konektoru můžeme pozorovat například škrábance, které vizuálně připomínají znečištění olejem nebo prachem. Poškození nebo nečistoty na konektoru mohou výrazně ovlivnit přesnost měření.

## 5.5. Popis měřených vláknových vlnodů

Měřené byly 3 různé typy jednovlákových optických vláken G.652.D, G.657.A1 a G.657.A1 typ 2. K měření bylo použito 5 kusů od každého typu vlákna, tedy celkem 15 vzorků, kde 3 kusy byly použity jako referenční vlákna a zbylých 12 optických vláken bylo určeno k ozáření. Všechny vzorky jsou jednovláková křemenná vlákna dopovaná germaniem, dlouhá 50 metrů. Pro lepší přehlednost používám v dalším textu značení z tabulky 6. Označení odpovídá vzorci „XREF“ pro referenční vzorky kde „X“ značí typ vlákna (1 – vlákno 1, 2 – vlákno 2, 3 – vlákno 3). Pro vzorky určené k ozáření odpovídá značení vzorci „XOZY“ kde „X“ značí typ vlákna (1 – vlákno 1, 2 – vlákno 2,

3 – vlákno 3) a „Y“ značí ozařovací dávku ( 1 – 33,5 kGy, 2 – 60,7 kGy, 3 – 100,5 kGy, 4 – 170,4 kGy).

**Tabulka 12:** Popis značení vzorků použitý ve výsledcích měření.

Typ vlákna	Odpovídající označení		Katalogový list
NPC-20S2D-J-050	Vlákno 1		Příloha A
NPC-20S7A-J-050/02	Vlákno 2		Příloha B
NPC-17S7A-J-050	Vlákno 3		Příloha C
Ozařovací dávka [kGy]	Typ vlákna a odpovídající zjednodušené označení v následujícím textu a výsledcích měření		
	Vlákno 1	Vlákno 2	Vlákno 3
0	1REF	2REF	3REF
33,5	1OZ1	2OZ1	3OZ1
60,7	1OZ2	2OZ2	3OZ2
100,5	1OZ3	2OZ3	3OZ3
170,4	1OZ4	2OZ4	3OZ4

## 6. Výsledky měření

Tato část bakalářské práce obsahuje naměřená data ve formě tabulek a grafů a vyhodnocení výsledků. Kapitola je rozčleněna na několik podkapitol podle typu použité měřicí metody. První podkapitolou jsou data získaná měřením pomocí přístroje OPTOKON OFT-4212. Následují výsledky získané pomocí spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C a poslední podkapitola uvádí naměřená data metodou OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry).

### 6.1. Výsledky měření přímou metodou – OFT-4212

Měření optických ztrát bylo provedeno pro čtyři vlnové délky, a to 1310, 1490, 1550 a 1625 nm. Nejprve byla změřena referenční vlákna pro možnost porovnání rozdílu útlumu vláken před a po ozáření. Referenční vlákna jsou 3 (označené 1REF, 2REF a 3REF). Před každým měřením byl přístroj zkalibrován. Kalibrace proběhla za pomoci rozbočnice 1x4, která byla připojena na optický zdroj a její 4 vlákna na detektory přístroje. Následně bylo provedeno vynulování útlumu pro všechny čtyři vlnové délky. Následovalo měření pro referenční vlákna. Všechna zakončení vláken byla před měřením vyčištěna od prachu a jiných nečistot. Měření proběhlo kromě referenčních vláken také pro vzorky určené k ozáření v rámci kontroly. Referenční měření probíhala bez přerušení pro každý typ vlákna 2 až 3 dny. Potom byly naměřené hodnoty zprůměrovány a tyto průměry jsou uvedeny v tabulce 13. V těchto i následujících měřeních odhaduji chybu při konektorování na  $\pm 0,3$  dB.

**Tabulka 13:** Naměřené hodnoty optického útlumu referenčních vláken a vláken určených k ozáření. Měřeno na vlnových délkách 1310, 1490, 1550 a 1625 nm.

Vlákno 1				
Vlnová délka [nm]	1310	1490	1550	1625
1REF $u(\lambda)$ [dB]	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2
1OZ1 $u(\lambda)$ [dB]	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2
1OZ2 $u(\lambda)$ [dB]	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2
1OZ3 $u(\lambda)$ [dB]	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3
1OZ4 $u(\lambda)$ [dB]	-0,1	-0,1	0,0	-0,1
Vlákno 2				
Vlnová délka [nm]	1310	1490	1550	1625
2REF $u(\lambda)$ [dB]	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
2OZ1 $u(\lambda)$ [dB]	0,0	0,0	-0,2	-0,1
2OZ2 $u(\lambda)$ [dB]	-0,4	-0,3	-0,4	-0,3
2OZ3 $u(\lambda)$ [dB]	0,0	0,0	0,0	-0,1
2OZ4 $u(\lambda)$ [dB]	0,0	-0,1	-0,1	-0,1
Vlákno 3				
Vlnová délka [nm]	1310	1490	1550	1625
3REF $u(\lambda)$ [dB]	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1
3OZ1 $u(\lambda)$ [dB]	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
3OZ2 $u(\lambda)$ [dB]	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2
3OZ3 $u(\lambda)$ [dB]	0,0	0,0	0,0	0,0
3OZ4 $u(\lambda)$ [dB]	-0,1	0,0	0,0	-0,1

Konektory, na které zůstala připojena pouze rozbočnice bez vzorků, sloužily ke sledování stability přístroje. Stabilita přístroje byla kontrolována z důvodu dlouhotrvajícího měření,

kdy během nočních a denních hodin dochází v laboratoři k teplotním změnám. Toto kontrolní měření prokázalo, že přístroj byl v průběhu měření stabilní. Pro kontrolu stability byl použit výpočet směrodatné odchylky naměřených hodnot, která byla menší než  $\pm 0,1$  dB.

### Měření po ozáření

Podobně jako v případě referenčního měření i pro toto měření proběhla kalibrace přístroje před samotným zapojením vláken. První měření probíhalo pro optická vlákna ozářená dávkou gama záření 33,5 kGy (vlákna označená 1OZ1, 2OZ1 a 3OZ1) a po několika dnech bylo paralelně s tímto měřením zapojeno za pomoci dalšího stejného přístroje měření pro optická vlákna ozářená dávkou gama záření 60,7 kGy (vlákna s označením 1OZ2, 2OZ2 a 3OZ2). S větším časovým rozestupem následovala měření optických vláken ozařovaných dávkami záření gama 100,5 kGy (1OZ3, 2OZ3 a 3OZ3) a 170,4 kGy (1OZ4, 2OZ4 a 3OZ4). Vlákna byla před měřením vyčištěna a pro kontrolu stability přístroje bylo v každém měření použito jedno z referenčních vláken a směrodatná odchylka určena z naměřených hodnot pro tuto referenci byla také menší než  $\pm 0,1$  dB. Naměřené hodnoty útlumů jednotlivých vzorků jsou zaznačeny v tabulce 14. Tyto hodnoty byly naměřeny ihned po ukončení ozařování tedy jsou ovlivněny relaxací vláken pouze minimálně.

**Tabulka 14:** Naměřené hodnoty optického útlumu pro různá vlákna a dávky ozáření.

Typ Vlákn	Vlnová délka [nm]			
	1310	1490	1550	1625
Ozařovací dávka 33,5 kGy				
1OZ1 u( $\lambda$ ) [dB]	-1,4	-1,9	-2,0	-2,3
2OZ1 u( $\lambda$ ) [dB]	-2,3	-2,3	-2,4	-2,5
3OZ1 u( $\lambda$ ) [dB]	-1,3	-1,6	-1,7	-1,9
Ozařovací dávka 60,7 kGy				
1OZ2 u( $\lambda$ ) [dB]	-1,3	-1,7	-1,9	<b>-2,2</b>
2OZ2 u( $\lambda$ ) [dB]	-1,9	-2,1	-2,3	<b>-2,6</b>
3OZ2 u( $\lambda$ ) [dB]	-1,6	-2,0	-2,2	<b>-2,5</b>
Ozařovací dávka 100,5 kGy				
1OZ3 u( $\lambda$ ) [dB]	-1,7	-2,3	-2,4	-2,8
2OZ3 u( $\lambda$ ) [dB]	-1,9	-2,0	-2,2	-2,4
3OZ3 u( $\lambda$ ) [dB]	-1,7	-2,4	-2,6	-3,0
Ozařovací dávka 170,4 kGy				
1OZ4 u( $\lambda$ ) [dB]	-2,2	-3,0	-3,4	-3,8
2OZ4 u( $\lambda$ ) [dB]	-2,4	-2,9	-3,2	-3,6
3OZ4 u( $\lambda$ ) [dB]	-2,0	-2,8	-3,1	-3,6

Podle získaných dat uvedených v tabulce 13 lze usoudit, že útlum podle předpokladů roste se zvyšující se dávkou ozáření pro všechny typy optických vláken. Nejvyšší optický útlum byl naměřen po ozařování dávkou 170,4 kGy pro všechny typy vláken a vlnové délky. Lze také pozorovat, že v případě ozařování dávkou 33,5 kGy a ozařování dávkou 60,7 kGy je optický útlum pro všechny vlnové délky nejvyšší u vlákna 2. Po vyšších ozařovacích dávkách se optické útlumy jednotlivých vláken začínají přibližovat. Vlivem ozařování došlo také ke změně zabarvení ferule optických vláken, lze to pozorovat na obrázku 14, kde vlevo je vlákno před ozářením a vpravo po ozáření.



**Obrázek 14:** Porovnání barvy zakončení vláken před ozářením vlevo a po ozářením vpravo.

### **Relaxace**

Relaxace vláken je proces, při kterém optický útlum po vystavení gama záření s časem klesá. Tento proces začíná okamžitě po ukončení ozařování a jedním z cílů bakalářské práce bylo zjistit, ve který okamžik se snižování optického útlumu zastaví. Měření probíhala pro ozařování OZ1 (33,5 kGy) více než 50 dní. Pro další měření byl tento počet snížen na 35 dní. Cílem těchto měření bylo sledovat, kdy útlum vláken přestane výrazně klesat. Výsledky měření jsou obsahem následujících tabulek. Tabulka 15 obsahuje výsledky měření pro vlákno 1, tabulka 16 výsledky pro vlákno 2 a tabulka 17 naměřené hodnoty útlumu pro vlákno 3. Každému ozáření je věnována jedna část tabulky. Zeleně označený řádek symbolizuje hodnoty útlumu pro referenční vlákno. Všechny tabulky obsahují řádek s názvem „po ozáření FIRST“, ve kterém jsou zaznamenány hodnoty ihned po ukončení ozařování (tyto hodnoty jsou vlastně shrnuty v tabulce 14). Další řádek s popiskem „Po ozáření MIN“ obsahuje minimální hodnoty útlumu naměřené v průběhu 35denního měření. V řádcích „Poslední změna“ (značeno PZ) je zaznamenán počet dnů od začátku měření do okamžiku, kdy se útlum ozařovaných vláken přestal výrazně měnit. Předposlední řádek tabulky „Po ozáření LAST“ obsahuje hodnoty naměřené s větším časovým odstupem od poslední změny. Konkrétní počty dnů jsou zapsány v posledním řádku tabulky. V průběhu měření došlo k několika přepojováním z důvodu opravy nebo výměny měřicího přístroje. Více informací bude zmíněno v části popisující vliv relaxace. V průběhu měření po ozáření dávkou 60,7 kGy se vyskytla chyba na zdroji na vlnové délce 1625 nm, a proto jsou tyto hodnoty značeny v tabulce tučně.

**Tabulka 15:** Naměřené hodnoty optického útlumu po ozáření pro vlákno 1.

Vlákno 1					
		Vlnová délka [nm]			
		1310	1490	1550	1625
1REF $u(\lambda)$ [dB]		-0,2	-0,2	-0,1	-0,2
Ozařovací dávka 33,5 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,4	-1,9	-2,0	-2,3
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-0,8	-1,0	-0,9	-1,1
Poslední změna	t [dny]	15	17	17	17
Po ozáření LAST	$u(\lambda)$ [dB]	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7
Počet dnů od PZ	t [dny]	303	301	301	301
Ozařovací dávka 60,7 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,3	-1,7	-1,9	<b>-2,2</b>
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-0,7	-1,0	-1,1	<b>-1,2</b>
Poslední změna	t [dny]	21	21	21	<b>21</b>
Po ozáření LAST	$u(\lambda)$ [dB]	-0,7	-0,8	-0,9	-1,0
Počet dnů od PZ	t [dny]	279	279	279	279
Ozařovací dávka 100,5 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,7	-2,3	-2,4	-2,8
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-0,9	-1,4	-1,4	-1,6
Poslední změna	t [dny]	23	23	23	23
Po ozáření LAST	$u(\lambda)$ [dB]	-0,9	-1,3	-1,4	-1,6
Počet dnů od PZ	t [dny]	67	67	67	67
Ozařovací dávka 170,4 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-2,2	-3,0	-3,4	-3,8
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-1,4	-2,0	-2,3	-2,5
Poslední změna	t [dny]	25	25	25	25



**Tabulka 16:** Naměřené hodnoty optického útlumu po ozáření pro vlákno 2.

Vlákno 2					
		Vlnová délka [nm]			
		1310	1490	1550	1625
2REF $u(\lambda)$ [dB]		-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Ozařovací dávka 33,5 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-2,3	-2,3	-2,4	-2,5
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-1,7	-1,6	-1,7	-1,6
Poslední změna	t [dny]	15	17	17	17
Po ozáření LAST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,7	-1,6	-1,6	-1,6
Počet dnů od PZ	t [dny]	303	301	301	301
Ozařovací dávka 60,7 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,9	-2,1	-2,3	<b>-2,6</b>
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-1,5	-1,7	-1,7	<b>-1,8</b>
Poslední změna	t [dny]	21	21	21	<b>21</b>
Po ozáření LAST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,5	-1,4	-1,5	-1,5
Počet dnů od PZ	t [dny]	279	279	279	279
Ozařovací dávka 100,5 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,9	-2,0	-2,2	-2,4
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-1,1	-1,3	-1,2	-1,2
Poslední změna	t [dny]	23	23	23	23
Po ozáření LAST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,2	-1,4	-1,4	-1,5
Počet dnů od PZ	t [dny]	67	67	67	67
Ozařovací dávka 170,4 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-2,4	-2,9	-3,2	-3,6
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-1,6	-2,0	-2,2	-2,4
Poslední změna	t [dny]	25	25	25	25

**Tabulka 17:** Naměřené hodnoty optického útlumu po ozáření pro vlákno 3.

Vlákno 3					
		Vlnová délka [nm]			
		1310	1490	1550	1625
3REF $u(\lambda)$ [dB]		-0,2	-0,1	-0,1	-0,1
Ozařovací dávka 33,5 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,3	-1,6	-1,7	-1,9
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-0,8	-1,0	-1,0	-1,0
Poslední změna	t [dny]	15	17	17	17
Po ozáření LAST	$u(\lambda)$ [dB]	-0,5	-0,6	-0,6	-0,8
Počet dnů od PZ	t [dny]	303	301	301	301
Ozařovací dávka 60,7 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,6	-2,0	-2,2	<b>-2,5</b>
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-0,8	-1,0	-1,1	<b>-1,3</b>
Poslední změna	t [dny]	21	21	21	<b>21</b>
Po ozáření LAST	$u(\lambda)$ [dB]	-0,7	-0,9	-0,9	-1,0
Počet dnů od PZ	t [dny]	279	279	279	279
Ozařovací dávka 100,5 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-1,7	-2,4	-2,6	-3,0
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-0,9	-1,4	-1,5	-1,6
Poslední změna	t [dny]	23	23	23	23
Po ozáření LAST	$u(\lambda)$ [dB]	-0,9	-1,3	-1,4	-1,7
Počet dnů od PZ	t [dny]	67	67	67	67
Ozařovací dávka 170,4 kGy					
Po ozáření FIRST	$u(\lambda)$ [dB]	-2,0	-2,8	-3,1	-3,6
Po ozáření MIN	$u(\lambda)$ [dB]	-1,2	-1,9	-2,0	-2,3
Poslední změna	t [dny]	25	25	25	25

## Vliv relaxace na optický útlum měřených vláken

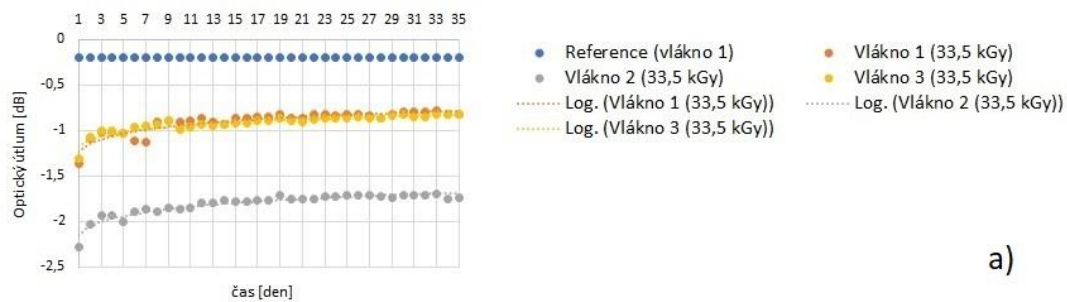
Hodnoty v následujících grafech odpovídají 35dennímu měření. Každá z hodnot odpovídá jedné naměřené hodnotě v daném dnu zvolené přibližně ve stejném čase pro každý den. Grafy porovnávají naměřené hodnoty útlumů třech typů vláken (vlákno 1, vlákno 2 a vlákno 3) pro jednu ozařovací dávku (33,5; 60,7; 100,5 nebo 170,4 kGy) a jednu ze čtyř vlnových délek (1310, 1490, 1550 nebo 1625 nm). V grafech lze pozorovat různé skokové změny hodnot. Ty byly zapříčiněny především manipulací s měřicím přístrojem. Bližší popis je uveden v tabulce 18. V grafech bylo využito logaritmické aproximace k proložení jednotlivých naměřených bodů z důvodu teoretického doplnění chybějících nebo chybných hodnot.

**Tabulka 18:** Popis příčin skokových změn naměřených hodnot optického útlumu.

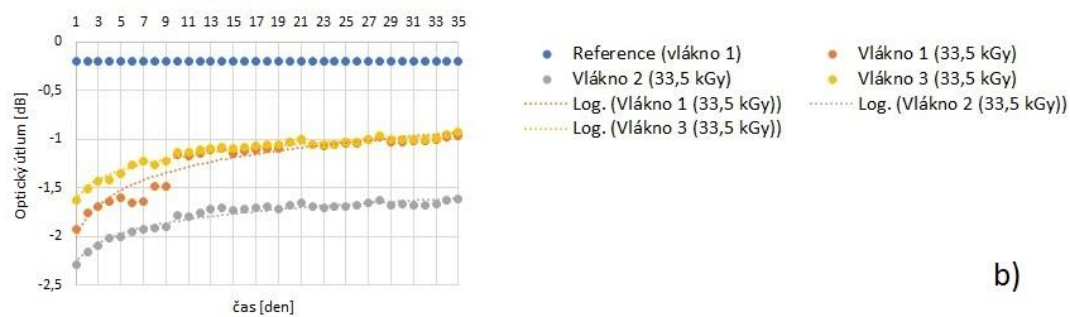
	Den	Příčina změny
Ozařování 1 (33,5 kGy)	9-11	Rozpojení měření z důvodu opravy měřicího přístroje a následné znovuzapojení.
Ozařování 2 (60,7 kGy)	11-15	Chyba při ukládání dat. Hodnoty úplně chybí, a proto jsou v grafech odhadnuty v intervalu mezi poslední naměřenou hodnotou v 11 dnu a první naměřenou hodnotou v 15 dnu.
	25+	Vlákna byla přepojena na jiný měřicí přístroj.
Ozařování 2 (60,7 kGy)	1-24	Na vlnové délce 1625 nm nastala chyba na zdroji a hodnoty kolísají přibližně o $\pm 0,5$ dB, a proto nejsou relevantní.

Z naměřených výsledků uvedených v obr.15 je patrné, že první naměřená hodnota (den 1 po ozáření) optického útlumu pro každé vlákno je vyšší než referenčního vlákna přibližně o 1,5 dB. Ozařování tedy způsobilo nárůst optického útlumu měřených vzorků. V prvním dnu dosahuje optický útlum pro všechna měřená vlákna své maximální hodnoty a v průběhu následujících dnů lze pozorovat pokles optického útlumu v důsledku relaxace vláken. Pokles útlumu je zpočátku více výrazný a po překročení určité hranice, která se pohybuje v rozmezí 15-17 dní se značně zpomalí. Lze pozorovat, že nejvyšší hodnoty útlumu vykazuje vlákno 2 pro všechny měřené vlnové délky. Toto vlákno má optický útlum vyšší o více než 0,5 dB ve srovnání se zbylými dvěma vlákny. S výjimkou obr.15 a) má druhý nejvyšší útlum vlákno 1, rozdíl je však menší a nepřesahuje odhadovanou chybu konektorování ( $\pm 0,3$  dB). Z naměřených dat v obr.15 tedy můžeme usoudit, že nejhorší útlumové vlastnosti má po ozařování dávkou 33,5 kGy vlákno 2, poté následuje vlákno 1 a vlákno 3.

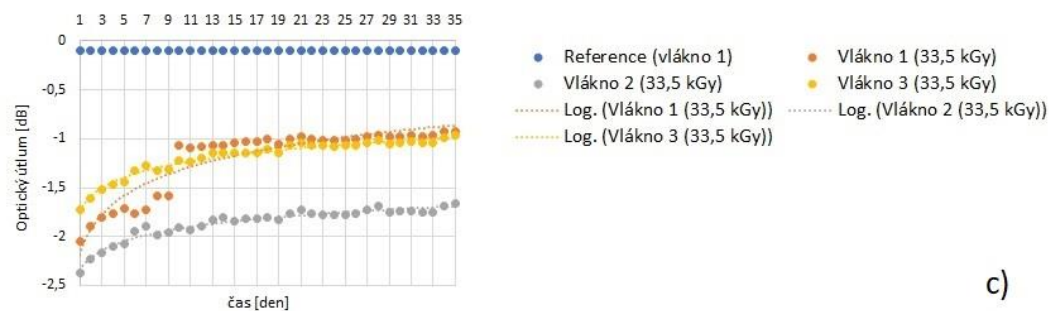
Na obrázku 16 můžeme pozorovat vliv relaxace optických vláken na optický útlum po ozáření dávkou gama záření 60,7 kGy. Nejvyšší útlum má pro všechny vlnové délky vlákno 2, následuje vlákno 3 a nejnižší útlum má vlákno 1. V průběhu tohoto měření došlo k přepojování na jiný měřicí přístroj a z tohoto důvodu některé hodnoty chybí. Odhadovaný průběh je dopočítán pomocí programu excel (proložení logaritmem). Optický útlum vláken přestává klesat přibližně ve 21 dnu měření. Lze také pozorovat, že hodnoty útlumů jednotlivých vláken se k sobě začínají přibližovat.



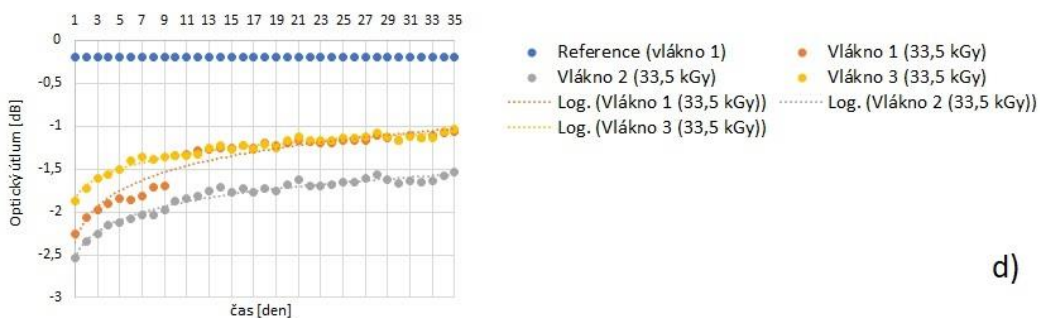
a)



b)

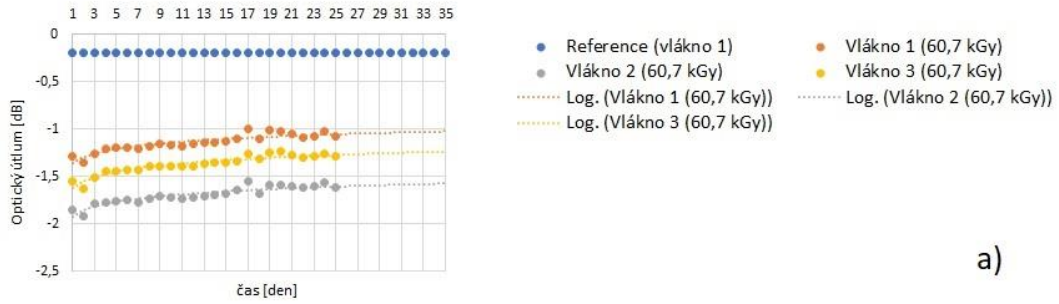


c)

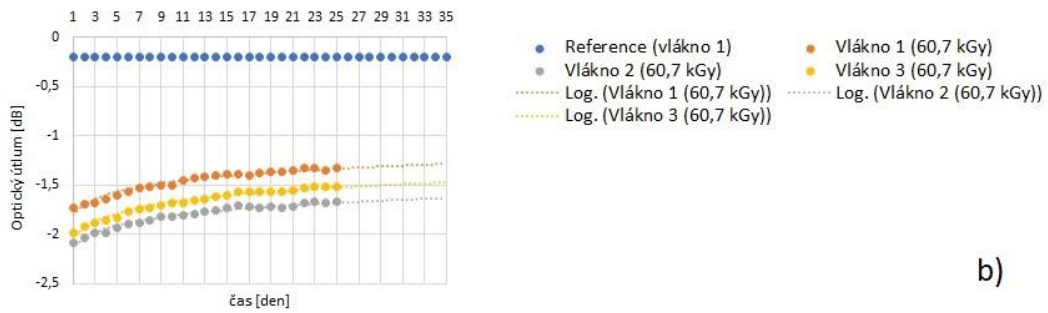


d)

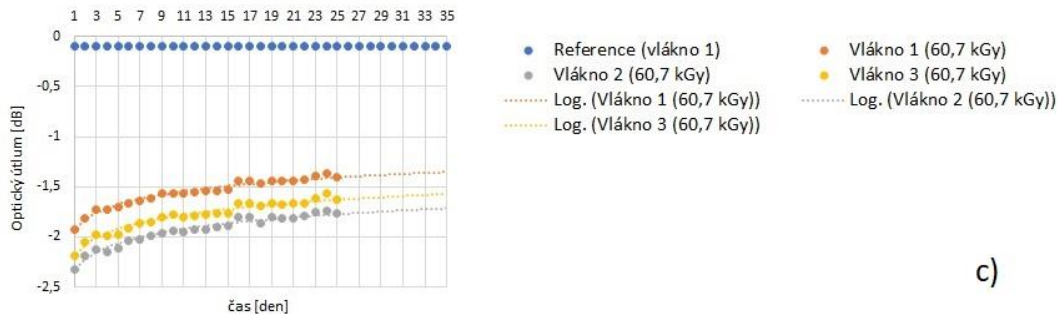
**Obrázek 15:** Sledování vlivu relaxace vláken na jejich optický útlum v průběhu 35denního měření po ozáření dávkou 33,5 kGy. Měřená vlnová délka a) 1310 nm, b) 1490 nm, c) 1550 nm, d) 1625 nm.



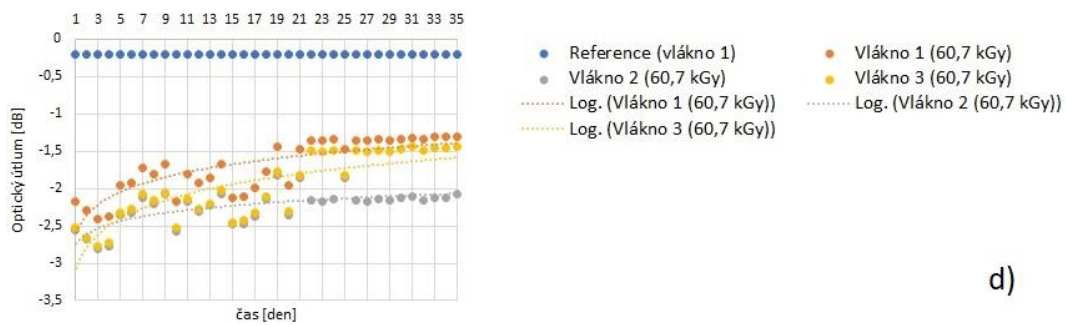
a)



b)



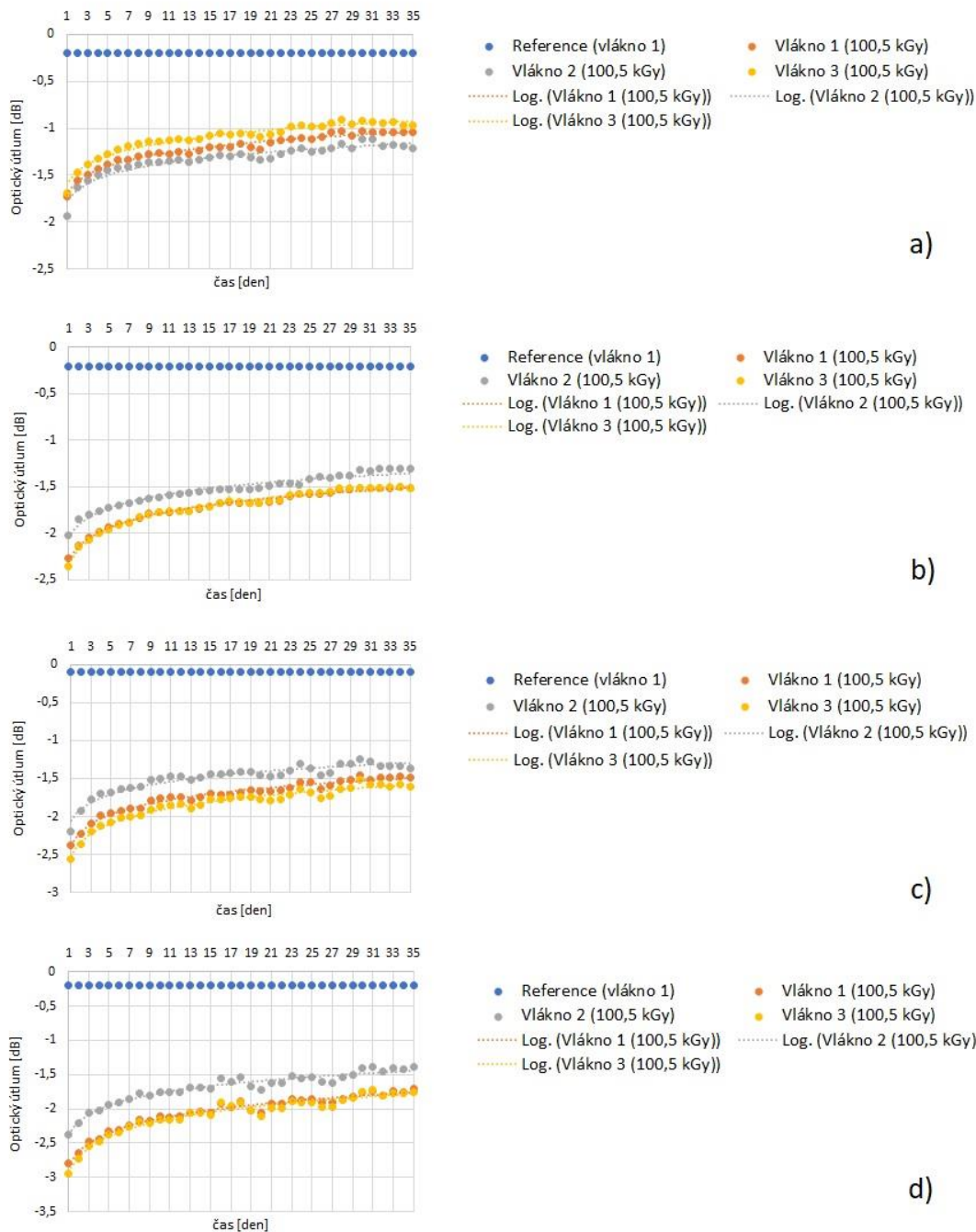
c)



d)

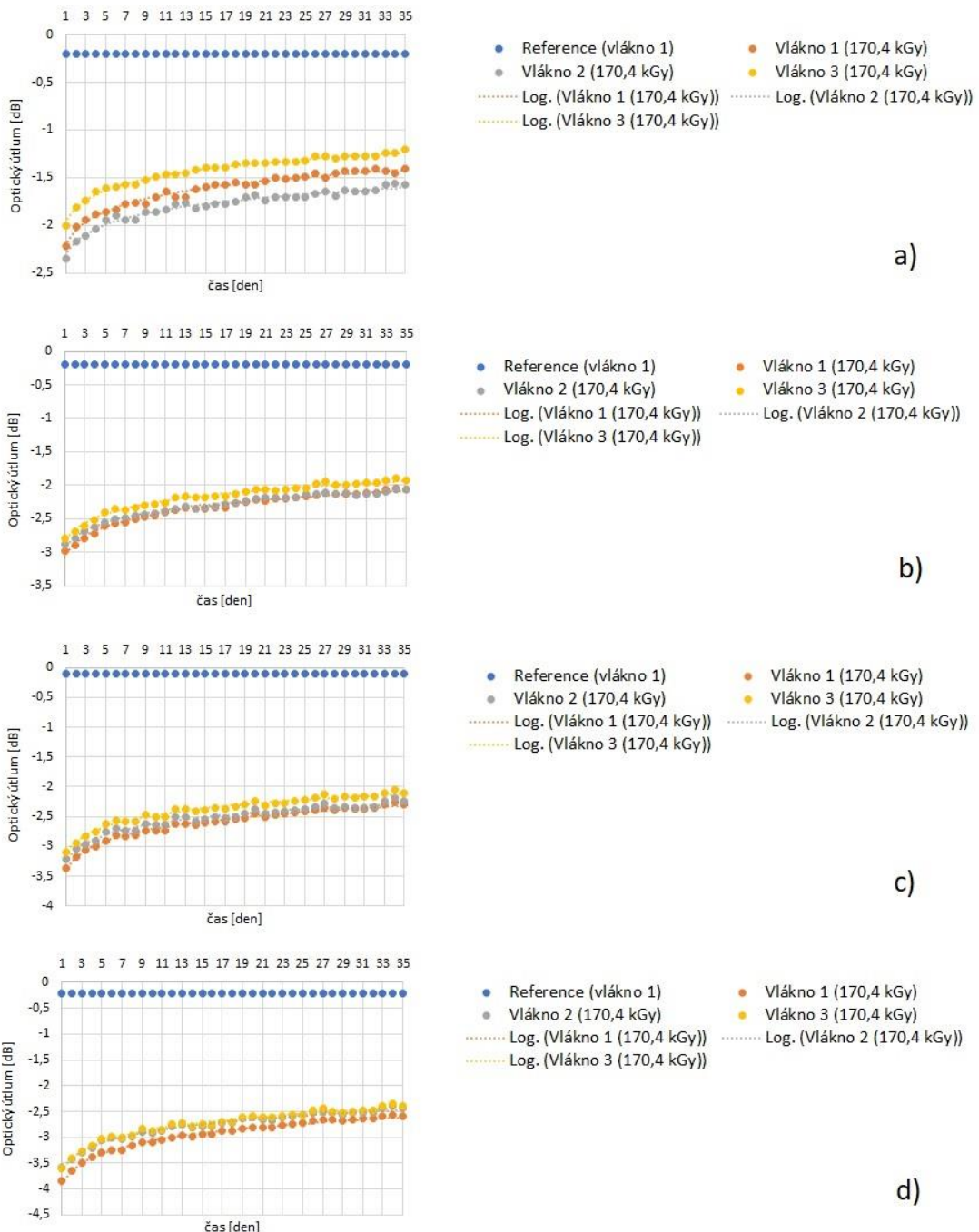
**Obrázek 16:** Sledování vlivu relaxace vláken na jejich optický útlum v průběhu 35denního měření po ozáření dávkou 60,7 kGy. Měřená vlnová délka a) 1310 nm, b) 1490 nm, c) 1550 nm, d) 1625 nm.

Obrázek 17 obsahuje naměřené hodnoty útlumu po ozáření dávkou gama 100,5 kGy. Pokud porovnáme naměřené hodnoty s obrázky 15 a 16 můžeme pozorovat mnohem menší rozdíl v optickém útlumu mezi jednotlivými vlákny. Vliv relaxace přestává být výrazný kolem 23 dne po ukončení ozařování.



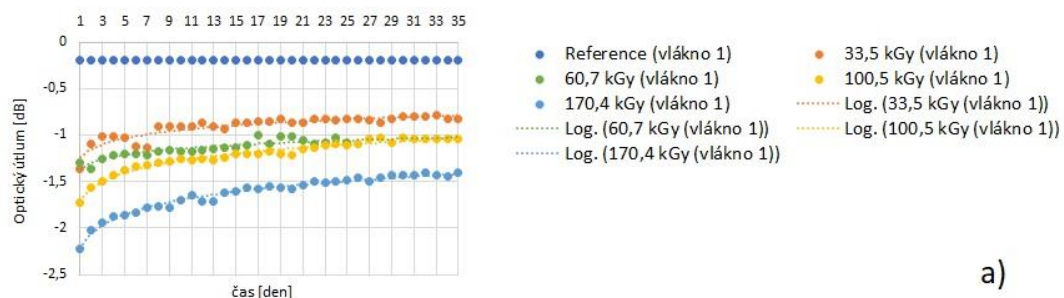
**Obrázek 17:** Sledování vlivu relaxace vláken na jejich optický útlum v průběhu 35denního měření po ozáření dávkou 100,5 kGy. Měřená vlnová délka a) 1310 nm, b) 1490 nm, c) 1550 nm, d) 1625 nm.

Na obrázku 18 jsou uvedeny závislosti optického útlumu vláken po ozáření dávkou 170,4 kGy na čase. V případě obr. 18 b) c) a d) lze pozorovat značně se překrývající hodnoty naměřených optických útlumů měřených vláken. Na obr. 18 a) nedochází k překrytí. Vzhledem k předchozím výsledkům lze říci, že rozdíl naměřených optických útlumů mezi jednotlivými vlákny se snižuje se zvyšující se dávkou záření gama.

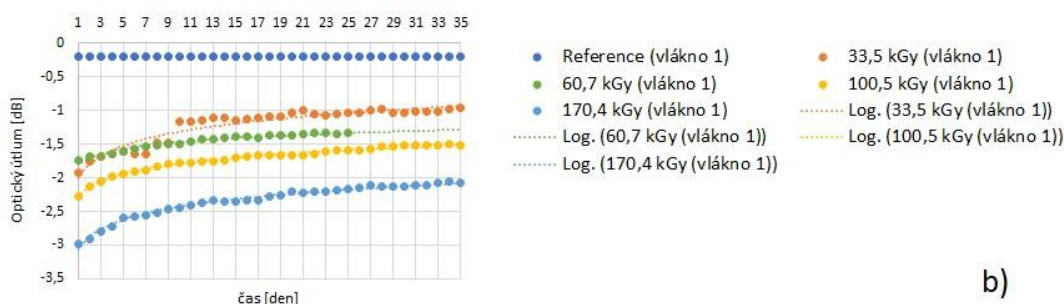


**Obrázek 18:** Sledování vlivu relaxace vláken na jejich optický útlum v průběhu 35denního měření po ozáření dávkou 170,4 kGy. Měřená vlnová délka a) 1310 nm, b) 1490 nm, c) 1550 nm, d) 1625 nm.

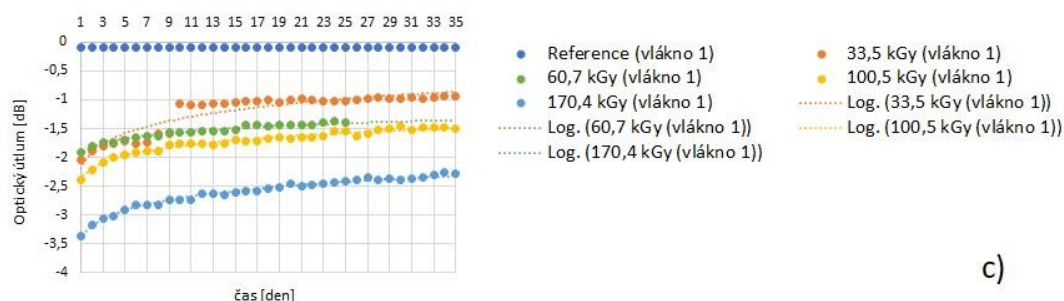
Na obrázcích 19, 20 a 21 je uvedeno porovnání vlivu různých ozařovacích dávek (33,5 kGy; 60,7 kGy; 100,5 kGy a 170,4 kGy) vždy pro jedno vlákno. Z obr. 19 a 21 je patrné, že optický útlum se zvyšuje se zvětšující se ozařovací dávkou. Na obrázku 20 lze pozorovat odchylku od tohoto trendu, kde je optický útlum po ozáření dávkou 100,5 kGy nižší než po ozáření dávkami 33,5 kGy a 60,7 kGy. Toto mohlo být způsobeno nepřesností měření v důsledku kvality spojů a při konektorování.



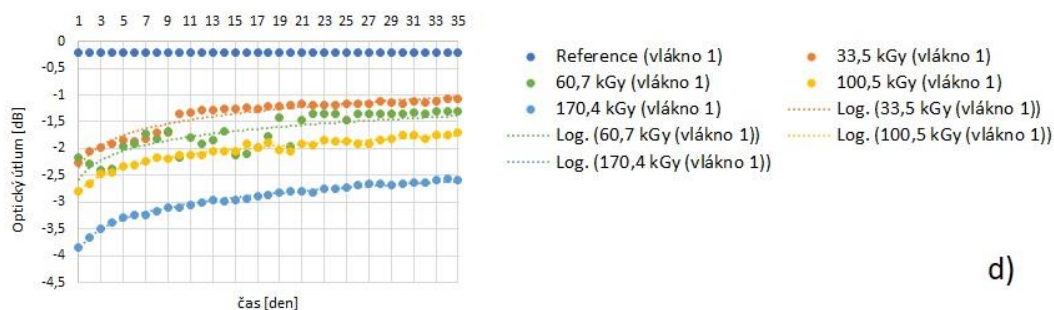
a)



b)



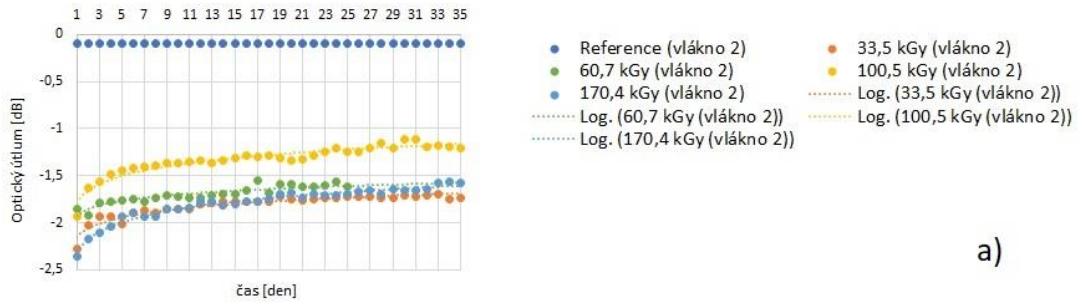
c)



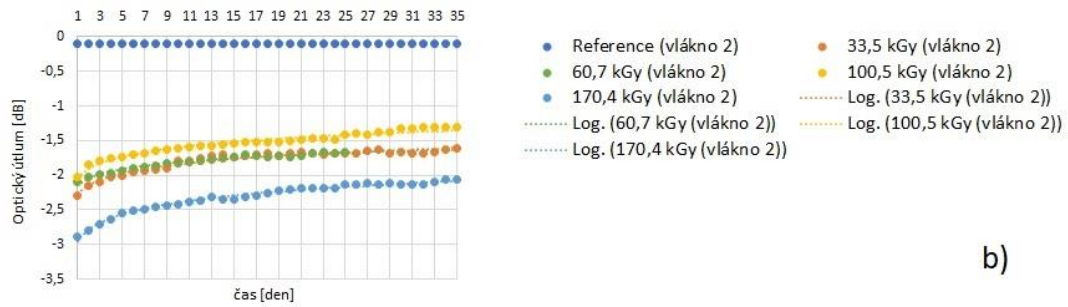
d)

**Obrázek 19:** Sledování vlivu relaxace vlákna 1 na jeho optický útlum v průběhu 35denního měření po ozáření různými dávkami záření gama. Měřená vlnová délka a) 1310 nm, b) 1490 nm, c) 1550 nm, d) 1625 nm.

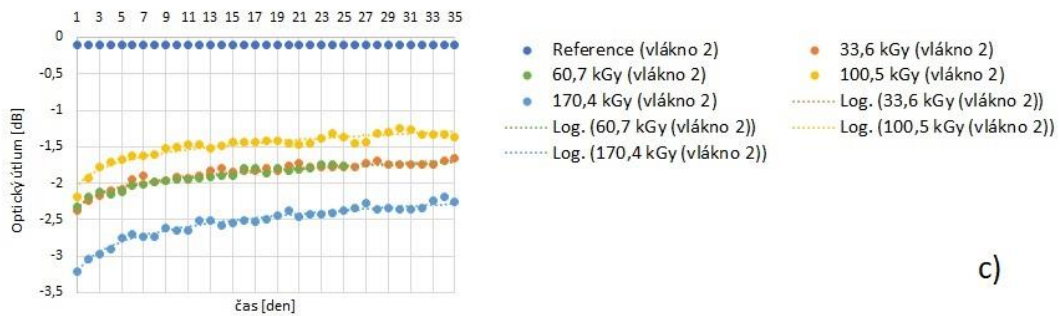




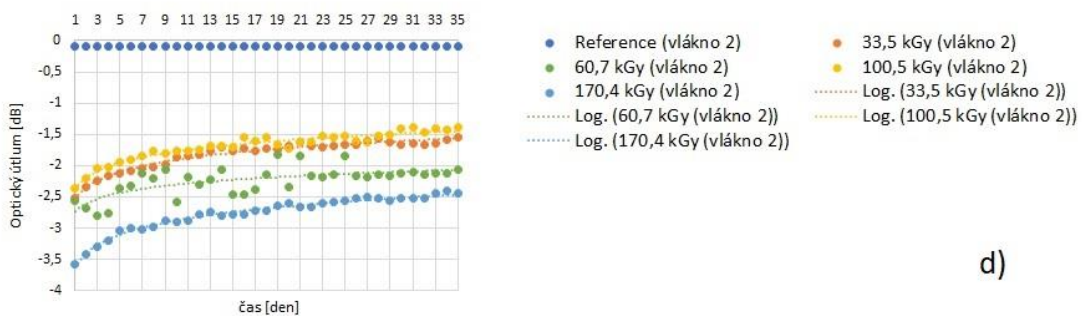
a)



b)

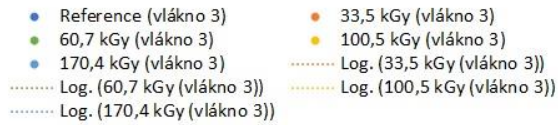
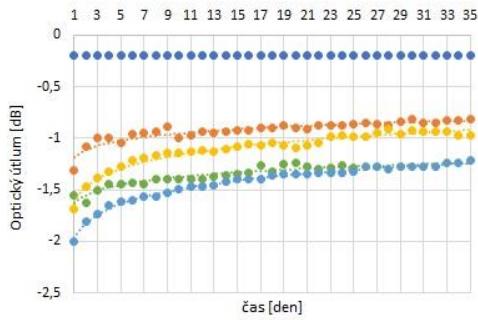


c)

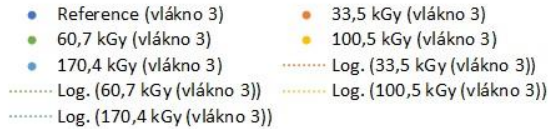
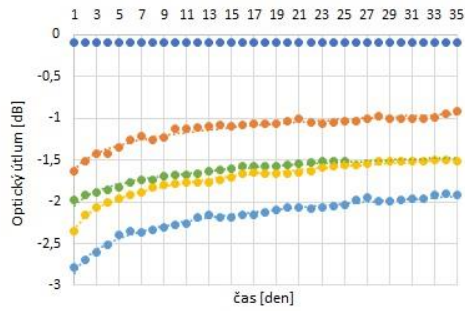


d)

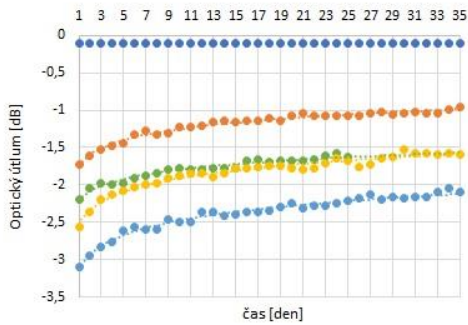
**Obrázek 20:** Sledování vlivu relaxace vlákna 2 na jeho optický útlum v průběhu 35denního měření po ozáření různými dávkami záření gama. Měřená vlnová délka a) 1310 nm, b) 1490 nm, c) 1550 nm, d) 1625 nm.



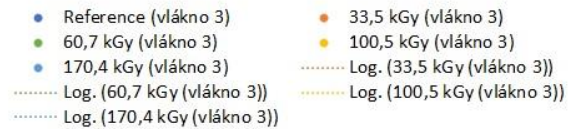
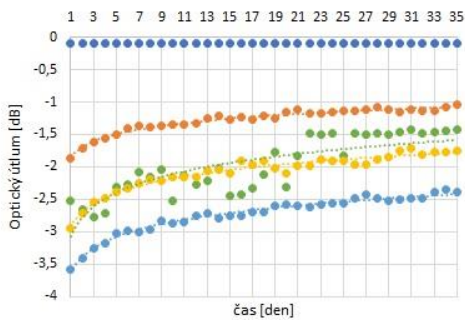
a)



b)



c)



d)

**Obrázek 21:** Sledování vlivu relaxace vlákna 3 na jeho optický útlum v průběhu 35denního měření po ozáření různými dávkami záření gama. Měřená vlnová délka a) 1310 nm, b) 1490 nm, c) 1550 nm, d) 1625 nm.

## 6.2. Spektrální charakteristiky

V rámci tohoto měření byla nejprve změřena vlákna hned po ozáření a později s určitým časovým odstupem. Měření spektrálních charakteristik bylo provedeno pro rozsah vlnových délek 600 až 1700 nm. Na obrázcích 22, 23 a 24 jsou uvedeny spektrální charakteristiky pro rozsah vlnových délek 1250-1650 nm. Ve všech měřeních byl postup následovný: nejprve bylo změřeno propojovací vlákno FC/PC-FC/APC. Potom byla změřena referenční vlákna a ozářená vlákna s využitím propojovacího vlákna. Přístroj měřil v dBm, pro získání výsledků v dB jsem použila vzorec uvedený níže:

$$\begin{aligned} & (\text{měřené vlákno} + \text{propojovací vlákno}) [\text{dBm}] - (\text{propojovací vlákno}) [\text{dBm}] \\ & = (\text{měřené vlákno}) [\text{dB}] \end{aligned}$$

### Grafy popisující závislost optického útlumu různých vláken na vlnové délce po ozáření dávkami 60,7 kGy a 170,4 kGy (bez vlivu relaxace).

Z grafů na obrázku 22 je patrné, že útlum vláken roste s rostoucí vlnovou délkou a se zvyšující se dávkou ozáření. Na obrázku 22 a) lze pozorovat po ozáření dávkou 60,7 kGy nárůst útlumu vlákna 1 vůči referenci o přibližně 2 dB na vlnových délkách 1310 a 1550 nm. Podobně je tomu po ozáření dávkou 170,4 kGy kde je viditelný nárůst útlumu na vlnové délce 1310 nm o přibližně 3,5 dB a na vlnové délce 1550 nm o přibližně 4 dB. Obrázek 22 b) zobrazuje naměřená data pro vlákno 2. Tyto naměřené hodnoty jsou pravděpodobně ovlivněny velkou chybou měření, která mohla být způsobena při přepojování nebo špatnou kvalitou spojky. Na obrázku 22 c) lze pozorovat po ozáření dávkou 60,7 kGy nárůst útlumu vlákna 3 pro vlnovou délku 1310 nm o přibližně 1,5 dB a pro vlnovou délku 1550 nm o 2 dB. Po ozařování dávkou 170,4 kGy je rozdíl 2 dB na vlnové délce 1310 a 3 dB na vlnové délce 1550 nm. Z tohoto měření lze usoudit, že nejlepší útlumové vlastnosti má vlákno 3.

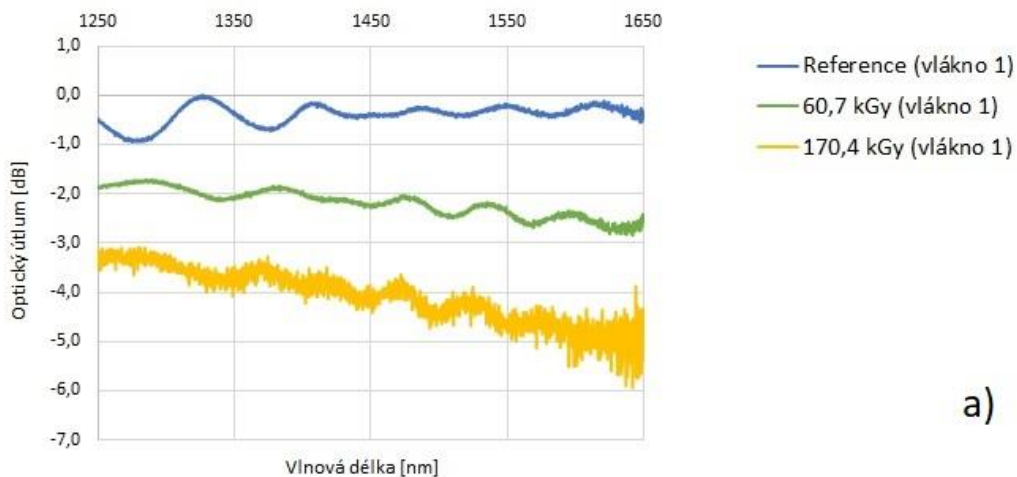
### Grafy popisující závislost optického útlumu jednoho vlákna na vlnové délce pro různé dávky ozáření s časovým odstupem (ovlivněno relaxací)

Grafy na obrázku 23 reprezentují data naměřená po ozáření s určitým časovým odstupem. Útlum vláken je tedy značně ovlivněn procesem relaxace. Informace o počtu dní mezi ukončením ozařování a začátkem tohoto měření jsou obsaženy v tabulce níže.

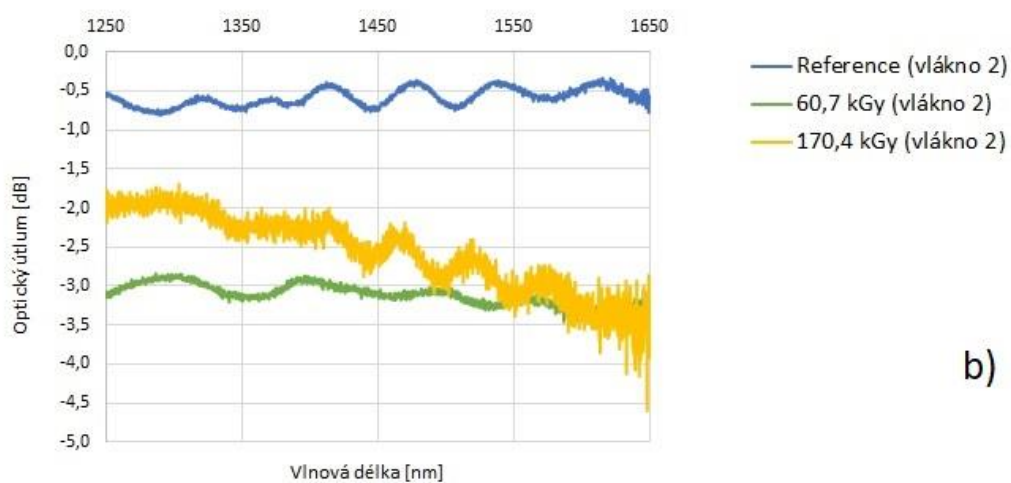
**Tabulka 19:** Počet dnů od skončení ozařování.

Ozařovací dávka [kGy]	Počet dnů od skončení ozařování
33,5	318
60,7	300
100,5	90
170,4	37

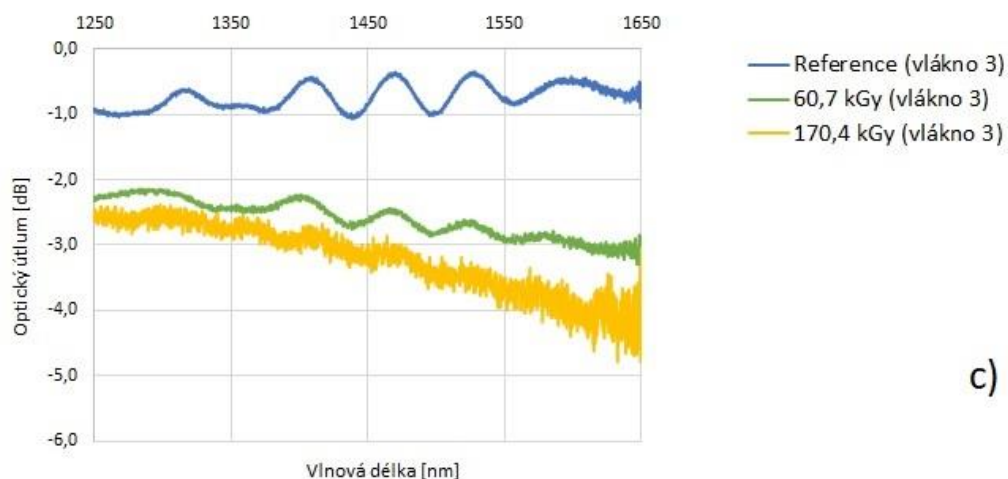
Naměřená data na obrázku 23 a) a 23 c) mají stejný trend, kde útlum vlákna roste s vlnovou délkou a se zvyšující se dávkou ozáření. Obrázek 23 b) tento trend nesleduje a pro ozařovací dávku 100,5 kGy je optický útlum mnohem nižší než pro ozařovací dávky 33,5 a 60,7 kGy, tudíž lze předpokládat velkou chybu měření.



a)

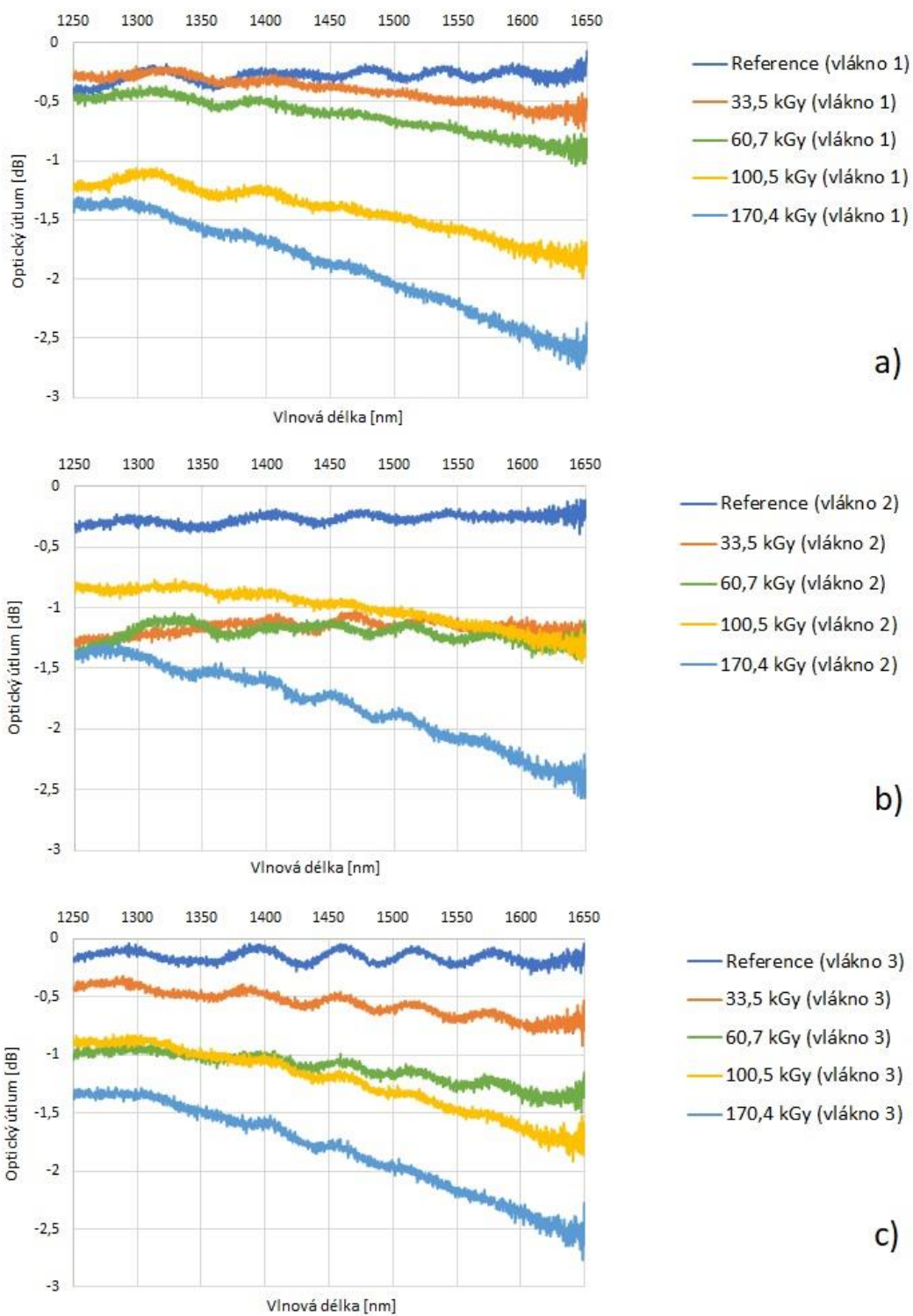


b)



c)

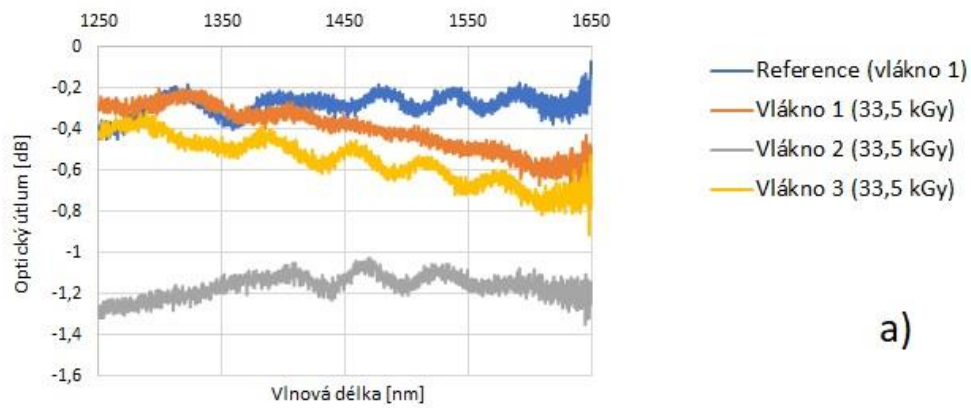
**Obrázek 22:** Závislost optického útlumu na vlnové délce po ozařování (bez vlivu relaxace) pro různé typy vláken a) vlákno 1, b) vlákno 2, c) vlákno 3.



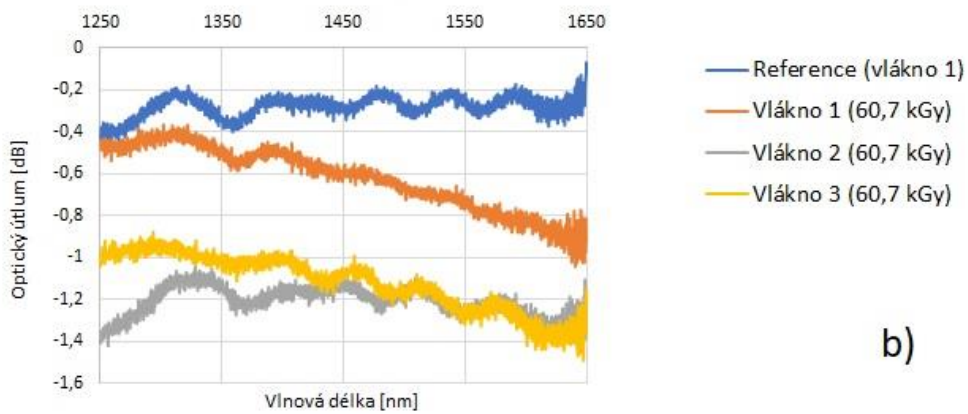
**Obrázek 23:** Závislost optického útlumu měřených vláken na vlnové délce pro různé ozařovací dávky (ovlivněno relaxací) a) vlákno 1, b) vlákno 2, c) vlákno 3.

### **Grafy porovnávající závislost útlumu tří různých vláken na vlnové délce pro stejnou ozařovací dávku (ovlivněno relaxací)**

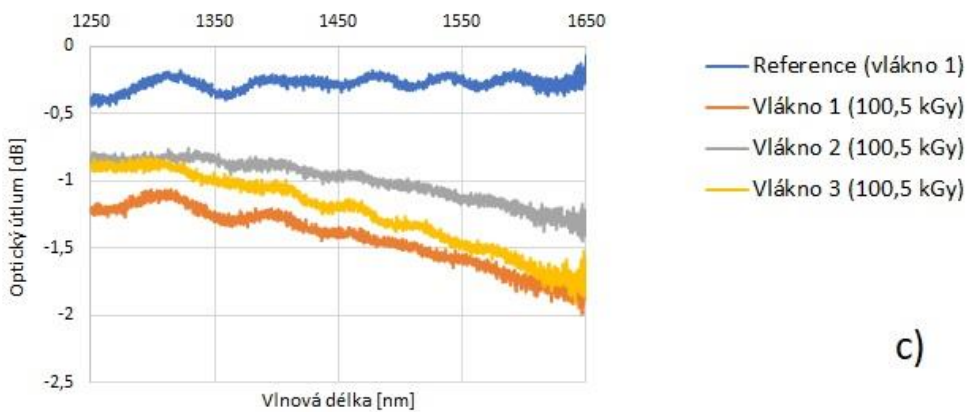
Na obrázku 24 a) lze pozorovat útlum měřených vláken po ozařování dávkou 33,5 kGy. Největší útlum má vlákno 2, a to přibližně 1,2 dB na vlnových délkách 1310 a 1550 nm. Útlum zbylých dvou vláken je pro tyto vlnové délky přibližně o 0,5 dB nižší. Obrázek 24 b) reprezentuje naměřené výsledky po ozařování dávkou 60,7 kGy a nejlepší útlumové vlastnosti má v tomto případě vlákno 1. Obrázek 24 c) zobrazuje výsledky po ozařování dávkou 100,5 kGy, kde mají všechna vlákna velmi podobný útlum a rozdíl je menší než 0,5 dB. Na posledním obrázku 24 d) po ozařování dávkou 170,4 kGy jsou útlumy všech měřených vláken téměř identické. Pokud bylo měření dostatečně přesné, lze předpokládat, že se zvyšující se ozařovací dávkou se hodnoty optického útlumu jednotlivých vzorků začínají přibližovat.



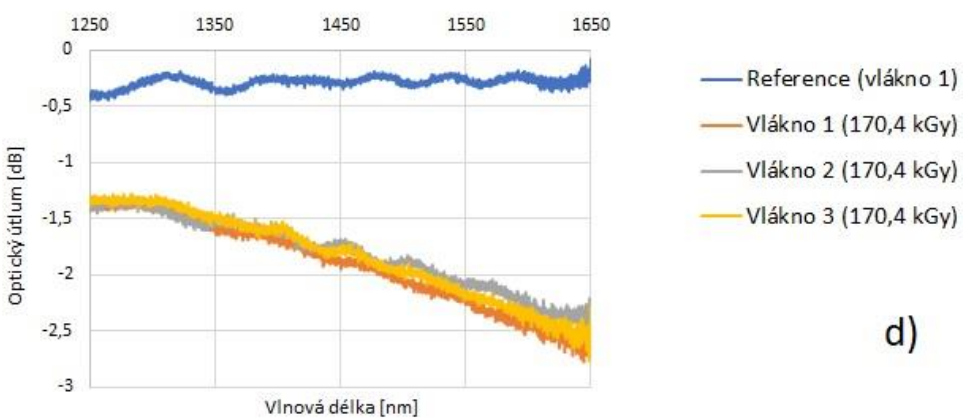
a)



b)



c)



d)

**Obrázek 24:** Porovnání útlumu různých typů vláken po ozáření (ovlivněno relaxací) po různých dávkách ozáření a) 33,5 kGy b) 60,7 kGy c) 100,5 kGy d) 170,4 kGy.

### 6.3. Výsledky měření metodou zpětného rozptylu (OTDR)

Měření touto metodou bylo provedeno pouze pro vlákna ozářována dávkou 170,4 kGy a referenčních neozářených vláken. Vyhodnocení tohoto měření proběhlo v programu TopOTDRViewer. Před každý vzorek bylo vždy zařazeno předřadné vlákno dlouhé 2 km. Pomocí markerů byl potom označen začátek a konec trasy a vypočítán útlum vláken. Na obrázku 25 je jeden ze zaznamenaných průběhů měřené trasy.



**Obrázek 25:** Výsledek měření metodou OTDR. Snímek z programu TopOTDRViewer pro vlákno 1 a vlnovou délku 1310 nm.

Data byla změřena pro vlnové délky 1310, 1550 a 1625 nm. Naměřené hodnoty optických útlumů referenčních vláken jsou shrnuty v tabulce 20 a naměřené hodnoty optických útlumů vláken po ozáření jsou uvedeny v tabulce 21.

**Tabulka 20:** Naměřené hodnoty optických útlumů referenčních vláken metodou OTDR a pomocí přístroje OPTOKON OFT-4212.

REFERENCE			
vlnová délka [nm]	1310		
typ vlákna	útlum [dB] (OFT-4212 )	útlum [dB] (OTDR)	délka trasy [km]
vlákno 1	-0,2	-0,4	0,05
vlákno 2	-0,1	-0,4	0,05
vlákno 3	-0,2	-0,1	0,05
vlnová délka [nm]	1550		
typ vlákna	útlum [dB] (OFT-4212 )	útlum [dB] (OTDR)	délka trasy [km]
vlákno 1	-0,1	-0,3	0,05
vlákno 2	-0,1	-0,4	0,05
vlákno 3	-0,1	-0,1	0,05
vlnová délka [nm]	1625		
typ vlákna	útlum [dB] (OFT-4212 )	útlum [dB] (OTDR)	délka trasy [km]
vlákno 1	-0,2	-0,4	0,05
vlákno 2	-0,1	-0,3	0,05
vlákno 3	-0,1	-0,2	0,05



**Tabulka 21:** Naměřené hodnoty útlumů optických vláken po ozáření dávkou 170,4 kGy metodou OTDR a přístrojem OPTOKON OFT-4212.

Ozařovací dávka 170,4 kGy			
vlnová délka [nm]	1310		
typ vlákna	útlum [dB] (OFT-4212 )	útlum [dB] (OTDR)	délka trasy [km]
vlákno 1	-2,2	-2,2	0,05
vlákno 2	-2,4	-2,0	0,05
vlákno 3	-2,0	-2,2	0,05
vlnová délka [nm]	1550		
typ vlákna	útlum [dB] (OFT-4212 )	útlum [dB] (OTDR)	délka trasy [km]
vlákno 1	-3,4	-3,6	0,05
vlákno 2	-3,2	-3,0	0,05
vlákno 3	-3,1	-3,0	0,05
vlnová délka [nm]	1625		
typ vlákna	útlum [dB] (OFT-4212 )	útlum [dB] (OTDR)	délka trasy [km]
vlákno 1	-3,8	-3,5	0,05
vlákno 2	-3,6	-3,2	0,05
vlákno 3	-3,6	-3,5	0,05

Hodnoty optických útlumů referenčních vláken naměřených metodou OTDR uvedené v tabulce 20 se od hodnot naměřených přístrojem OPTOKON OFT-4212 odlišují maximálně o  $\pm 0,2$  dB. Optické útlumy ozařovaných vláken naměřené metodou OTDR z tabulky 21 se v porovnání s hodnotami, které jsem získala měřením pomocí přístroje OPTOKON OFT-4212 odlišují maximálně o  $\pm 0,4$  dB. Je tomu tak pro všechny vlnové délky a všechny typy měřených vláken. Výsledky těchto dvou metod jsou velmi podobné.

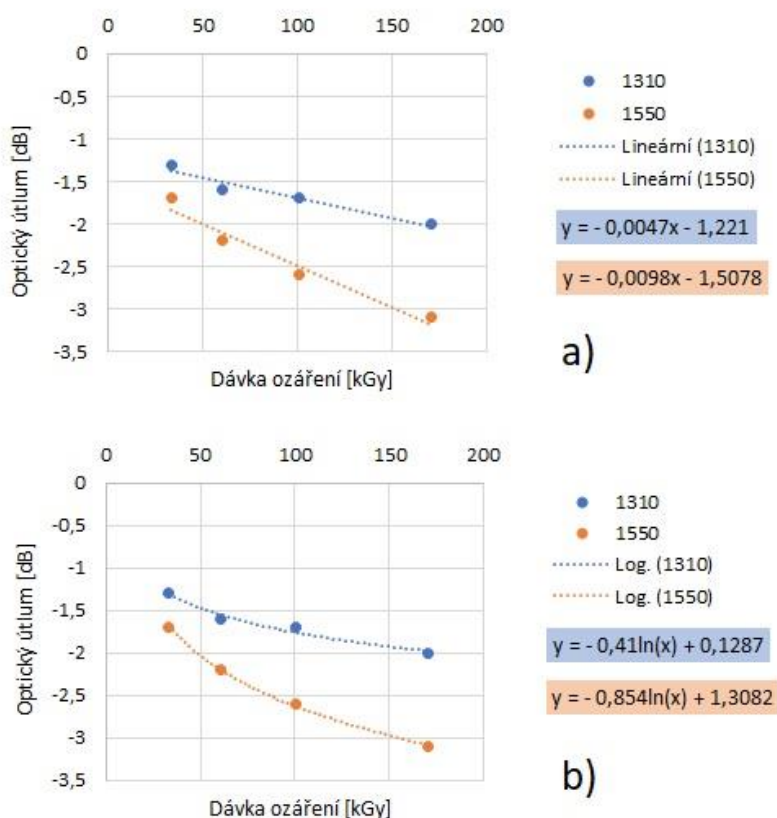
## Odhad optického útlumu pro vyšší ozařovací dávky

Na základě naměřených optických útlumů vláken po ozáření dávkami gama 33,5; 60,7; 100,5 a 170,4 kGy (naměřeno 1. den po ukončení ozařování tzn. bez vlivu relaxace) jsem provedla teoretický výpočet optických útlumů pro vyšší ozařovací dávky a to 500, 1000, 1500 a 2000 kGy. Výpočet jsem provedla pro vlákno 3 na vlnových délkách 1310 a 1550 nm. Naměřené hodnoty optických útlumů vlákna 3 pro vlnové délky 1310 a 1550 nm jsou obsahem tabulky 21.

**Tabulka 22:** Naměřené hodnoty optického útlumu pro vlákno 3.

Vlákno 3		Vlnová délka [nm]	
Ozařovací dávka [kGy]		1310	1550
33,5	Útlum [dB]	-1,3	-1,7
60,7		-1,6	-2,2
100,5		-1,7	-2,6
170,4		-2,0	-3,1

Provedla jsem celkem dva výpočty. V prvním výpočtu jsem předpokládala, že útlum roste lineárně se zvyšující se dávkou ozáření a ve druhém výpočtu uvažuji logaritmickou závislost. K výpočtu jsem použila proložení naměřených bodů optických útlumů vlákna 3 přímkou a logaritmem. Grafické znázornění včetně získaných rovnic potřebných k výpočtu je na obrázku 26 a) a b).



**Obrázek 26:** Závislost optického útlumu vlákna 3 na absorbované dávce záření gama pro vlnové délky 1310 a 1550 nm – a) lineární závislost, b) logaritmická závislost.

**Ukázkový výpočet optického útlumu vlákna 3 pro ozařovací dávku 500 kGy, lineární závislost a vlnovou délku 1310 nm:**

Použijeme rovnici z obrázku 26 a) kde uvažujeme, že proměnná  $y$  je neznámý optický útlum a proměnná  $x$  je dávka záření gama. Rovnici tedy můžeme přepsat následovně:

$$\alpha(\lambda) = -0,0047 \cdot D - 1,221$$

$\alpha(\lambda)$  – optický útlum [dB]

$D$  – absorbovaná dávka záření gama [kGy]

Po dosazení do rovnice získáme hledaný optický útlum:

$$\alpha(\lambda) = -0,0047 \cdot 500 - 1,221 = -3,571 \doteq -3,6 \text{ dB}$$

Vypočítané hodnoty optického útlumu vlákna 3 pro lineární a logaritmickou závislost jsou zaznamenány v tabulce 22.

**Tabulka 23:** Vypočítané hodnoty optického útlumu vlákna 3 pro vyšší dávky ozáření.

Vlnová délka 1310 nm		
Ozařovací dávka [kGy]	Útlum vlákna [dB]	
	Lineární	Logaritmická
500	-3,6	-2,4
1000	-5,9	-2,7
1500	-8,3	-2,9
2000	-10,6	-3,0
Vlnová délka 1550 nm		
Ozařovací dávka [kGy]	Útlum vlákna [dB]	
	Lineární	Logaritmická
500	-6,4	-4,0
1000	-11,3	-4,6
1500	-16,2	-4,9
2000	-21,1	-5,2

Z vypočítaných hodnot je patrné, že lineární průběh v porovnání s logaritmem rychle klesá, a při dávce 2000 kGy by optický útlum vlákna 3 nabýval hodnoty -10,6 dB na vlnové délce 1310 nm a -21,1 dB na vlnové délce 1550 nm. Logaritmický průběh se blíží ke konkrétní hodnotě a při dávce 2000 kGy dosahuje optický útlum vlákna 3 hodnoty -3,0 dB na vlnové délce 1310 nm a -5,2 dB na vlnové délce 1550 nm. Vzhledem k tomu, že při ozařování optických vláken dochází k značným změnám v jejich struktuře a vlákna postupně ztrácí svoji schopnost přenášet výkon, předpokládala bych při uvažovaných ozařovacích dávkách výrazný nárůst různých deformací a optického útlumu čemuž lépe odpovídá lineární průběh.

## Navýšení celkových ztrát optického systému

V tomto výpočtu jsem použila hodnoty z příkladu pro bilanci optického výkonu z kapitoly optický komunikační systém. Cílem je porovnat, jak se navýší celkové ztráty mezi zdrojem a detektorem optického systému pro různé délky tras, pokud nahradíme původní vlákno ozářeným vláknem. Ve výpočtu jsem uvažovala naměřené hodnoty optického útlumu pro vlákno 1 po ozáření dávkou 170,4 kGy na vlnových délkách 1310 a 1550 nm. Původní vlákno mělo měrný útlum 0,4 dB/km a vlákno 1 po ozáření dávkou 170,4 kGy má měrný útlum 44 dB/km na vlnové délce 1310 nm a 68 dB/km na vlnové délce 1550 nm. Vypočítané hodnoty celkových ztrát jsou uvedeny v tabulce 24.

**Tabulka 24:** Vypočítané hodnoty celkových ztrát mezi zdrojem a detektorem po nahrazení původního vlákna s optickým útlumem 0,4 dB/km ozářeným vláknem.

Vlnová délka [nm]		1310		1550	
Délka trasy [km]	Celkové ztráty [dB]	Celkové ztráty s OZ [dB]	Rozdíl [dB]	Celkové ztráty s OZ [dB]	Rozdíl [dB]
0,1	2,04	6,4	4,36	8,8	6,76
0,5	2,20	24	21,80	36	33,80
1	2,40	46	43,60	70	67,60
2	2,80	90	87,20	138	135,20
5	4,00	222	218,00	342	338,00
10	6,00	442	436,00	687	681,00

Z tabulky je patrné, že již při délce vlákna 100 metrů je nárůst celkových ztrát pro obě vlnové délky poměrně vysoký a pro delší trasy jsou již celkové ztráty obrovské a ozářené vlákno není vhodné k přenosu výkonu.

## 7. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo sledovat vliv záření gama na optický útlum jednovidových optických vláken. Optický útlum se vlivem vystavení záření gama zvyšuje. V bakalářské práci jsem se při měření zaměřila na sledování relaxace, kdy optický útlum po ukončení ozařování začne klesat. Měřila jsem 3 typy optických vláken s délkou 50m, která odpovídala standardům ITU-T G.652.D (vlákno 1), G.657.A1/II (vlákno 2) a G.657.A1 (vlákno 3). Ozařování probíhalo v ozařovně PANOZA na pracovišti ÚJV Řež, a.s. a jako zdroj záření byl použit  $^{60}\text{Co}$ . Ozářená vlákna byla vystavena celkovým dávkám 33,5; 60,7; 100,5 a 170,4 kGy. Hlavní část měření jsem prováděla pomocí přístroji OPTOKON OFT-4212, kde jsem optický útlum vláken měřila na čtyřech vlnových délkách 1310, 1490, 1550 a 1625 nm. Pro možnost porovnání optického útlumu před ozářením a po ozáření jsem nejprve změřila 3 referenční vlákna a potom vlákna ozářená dávkami záření gama. Měření prokázalo, že optický útlum vláken roste se zvyšující se absorbovanou dávkou záření gama. Nejvyšší optický útlum -3,8 dB (1.den po ukončení ozařování) byl naměřen po ozáření dávkou 170,4 kGy na vlnové délce 1625 nm pro vlákno 1. Naopak nejnižší optický útlum po ozáření stejnou dávkou byl naměřen na vlnové délce 1310 nm pro vlákno 3 a to -2,0 dB. Nárůst optického útlumu vláken po ozáření vůči referenci (uvažuji referenční vlákno s útlumem 0,2 dB) se pohyboval v rozmezí -1,1 až -3,6 dB v závislosti na typu vlákna, vlnové délce a absorbované dávce záření gama.

Dále jsem sledovala proces relaxace optických vláken v průběhu 35 dní. Z naměřených dat lze pozorovat, výrazný pokles útlumu optických vláken vlivem relaxace po ozáření dávkou 33,5 kGy přibližně do 17 dne měření po ozáření a poté se rychlost poklesu zpomalí. Pro vlákna ozářená dávkou 60,7 kGy je to 21 den. V případě ozařovací dávky 100,5 kGy optický útlum přestává klesat po překročení 23 dne a pro dávku 170,4 kGy se proces zpomalí kolem 25 dne. Pokles útlumu měřených optických vláken vlivem relaxace vzhledem k hodnotám naměřeným 1. den po ukončení ozařování se pohybuje v rozmezí 0,5-1,3 dB. Přičemž nižší pokles optického útlumu byl naměřen pro nižší ozařovací dávky a se zvyšující se ozařovací dávkou vlivem relaxace byl pokles útlumu vyšší.

Provedla jsem také kontrolní měření s větším časovým odstupem (přibližně 300 dní pro vlákna ozařovaná dávkou 33,5 a 60,7 kGy a přibližně 60 dní pro vlákna ozářená dávkou 100,5 kGy), kde jsem naměřila pokles útlumu vlivem relaxace o přibližně 0,5 dB. Měření také ukázalo, že při nižších ozařovacích dávkách (33,5 a 60,7 kGy) má nejvyšší útlum vlákno 2 (G.657.A1/II) pro všechny vlnové délky. Pro dávku ozáření 33,5 kGy optické útlumy vláken 1 a 3 nabývají přibližně stejných hodnot. V případě ozařovací dávky 60,7 kGy má nejnižší útlum vlákno 1. Se zvyšující se dávkou ozáření začínají být naměřené hodnoty optických útlumů měřených vláken srovnatelné. Při nejvyšší dávce 170,4 kGy jsem zjistila, že optický útlum měřených vláken (1, 2 a 3) je srovnatelný pro všechny vlnové délky, respektive nedá se jednoznačně určit, že by některý typ vlákna měl výrazně nižší optický útlum.

Dále jsem provedla měření pomocí spektrálního analyzátoru YOKOGAWA AQ6370C v pásmu vlnových délek 600 až 1700 nm. Z výsledků tohoto měření lze usoudit, že optický útlum ozářených vláken roste s rostoucí vlnovou délkou. Optická vlákna ozářená dávkou záření gama 170,4 kGy jsem také změřila metodou OTDR. Toto měření vedlo k podobným výsledkům jako měření na přístroji OPTOKON OFT-4212. Na základě naměřených hodnot optického útlumů vlákna 3 (1.den po ukončení ozařování) pomocí přístroje OPTOKON OFT-4212 jsem také provedla teoretický výpočet optického útlumu tohoto vlákna v případě, že by bylo ozářeno vyššími dávkami záření gama

a to 500; 1000; 1500 a 2000 kGy na vlnových délkách 1310 a 1550 nm. Při výpočtu jsem předpokládala lineární nebo logaritmickou závislost optického útlumu na dávce záření gama. Pro nejvyšší dávku 2000 kGy byla teoretická hodnota optického útlumu pro lineární závislost -10,6 dB na vlnové délce 1310 nm a -21,1 dB na vlnové délce 1550 nm. Pro logaritmickou závislost byly hodnoty útlumu -3,0 dB na vlnové délce 1310 nm a -5,2 dB na vlnové délce 1550 nm.

## 8. Použitá literatura

- [1] KONEČNÁ, Zuzana. *Unusual Attenuation Recovery Process After Fiber Optic Cable Irradiation* [online]. [cit. 2022-05-1] Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/266/1/012005>
- [2] NOVOTNÝ, Karel, Tomáš MARTAN a Jan ŠÍSTEK. *Optické komunikační systémy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN: 80-01-02810-0
- [3] NOVOTNÝ, Karel. *Optická komunikační technika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01642-0
- [4] *Optical fiber Attenuation* [online]. [cit. 2022-4-15] Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95052294-optical-fiber-attenuation>
- [5] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: Centa, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1
- [6] ZIKMUND, Marek. *Studium vlastností optických vláken s dotací ionty erbia*. Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická.
- [7] *Multimode Fiber Types: OM1 vs OM2 vs OM3 vs OM4 vs OM5* [Online]. Dostupné z: <https://community.fs.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-multimode-fiber.html>
- [8] *Comparison Between OS1 and OS2 SMF Cables* [Online]. [cit. 2022-5-10] Dostupné z: <https://community.fs.com/blog/os1-vs-os2-smf-cables.html>
- [9] NAVRÁTIL, Oldřich a kolektiv. *Jaderná chemie*. 3. doplněné a rozšířené vyd. Praha: ČSAV, 1985
- [10] LÁZNA, Tomáš. *Měření záření gama*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [11] MASOPUSTOVÁ, Kateřina. *Měření vlastností optických vláken a kabelů pro případné použití v extrémních podmínkách*. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická
- [13] *Spektrální analyzátor YOKOGAWA AQ6370C* [Online]. [cit. 2022-4-8] Dostupné z: [https://tmi.yokogawa.com/solutions/discontinued/aq6370c-optical-spectrum-analyzer/#Documents-Downloads\\_downloads\\_4](https://tmi.yokogawa.com/solutions/discontinued/aq6370c-optical-spectrum-analyzer/#Documents-Downloads_downloads_4)
- [14] *Optický reflektometr (OTDR)* [Online]. [cit. 2022-3-25] Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/249152/mod\\_resource/content/2/OKS2012-OTDR.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/249152/mod_resource/content/2/OKS2012-OTDR.pdf)
- [15] DUBSKÝ, Pavel a Maciej KUCHARSKI. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. Praha: MIKROKOM, 1994
- [16] *MOT-940 Mini OTDR series* [online]. [cit. 2022-2-14] Dostupné z: [https://intra.optokon.com/intra/product-documents/10/MOT-940%20Mini%20OTDR%20series\\_2020-06-22.pdf](https://intra.optokon.com/intra/product-documents/10/MOT-940%20Mini%20OTDR%20series_2020-06-22.pdf)

[17] *Connector end-face* [Online]. [cit. 2021-12-15] Dostupné z:  
<https://learn.aflglobal.com/cleaning/the-achilles-heel-of-fiber-optic-networks>



## **9. Seznam příloh**

Přílohy, které nejsou součástí bakalářské práce:

Příloha A – Single mode fiber G.652.D

Příloha B – Single mode fiber G.657.A1/II

Příloha C – Single mode fiber G.657.A1

Příloha D – FC Patchcord