

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Vliv uchycení optických vláken na měření pomocí DTS
systému**

**Influence of Attachment Optical Fibers to the Measurements
using DTS system**

2014

Stanislav Lovecký

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Stanislav Lovecký**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Vliv uchycení optických vláken na měření pomocí DTS systému.
Influence of Attachment Optical Fibers to the Measurements using DTS
System.**

Zásady pro vypracování:

1. Popis rozptylu světla.
2. Možnosti uchycení optických vláken.
3. Výběr vhodných způsobů uchycení optických vláken a proměření jejich vlastností při použití DTS systému.

Seznam doporučené odborné literatury:

AGRAWAL, Govind P.: Nonlinear Fiber Optics, The Institute of Optics - University of Rochester, Academic Press, 1995. ISBN 0-12-045143-3.

DADO, M., TUREK, I., ŠTELINA, J., BITTERE, L., TUREK, S., GROLMUS, E., STIBOR, P.: Kapitoly z optiky pre technikov, Žilinská univerzita, Žilina, 1998. ISBN 80-7100-390-5

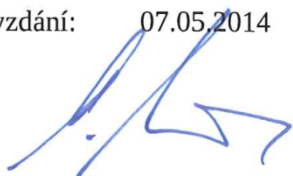
DOLEČEK, J.: Moderní učebnice elektroniky 3.díl - Optoelektronika a optoelektronické prvky, Ben, Praha, 2005. ISBN 80-7300-184-5

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Jaroš**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *6. května 2014*



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Jakobovi Jarošovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá využitím optovláknových distribuovaných systémů na měření vlivu různých způsobů uchycení optických vláken. Jako distribuovaný systém byl využit systém, který pracuje na Stimulovaném Brillouinově rozptylu. Tento systém je schopen měřit jak napětí, tak teplotu podél optického vlákna. Cílem této bakalářské práce je zjistit vliv odlišných způsobů uchycení optického vlákna na jeho deformaci. Vliv této deformace byl experimentálně simulován na vyrobeném přípravku na měření v laboratoři přenosových médií fakulty elektroniky a informatiky. Výsledné naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek a grafů.

Klíčová slova

Optovláknový distribuovaný systém; DTS; DSTS; stimulovaný Brillouinův rozptyl; optická vlákna; vliv uchycení optických vláken

Abstract

The bachelor thesis focuses on a utilization of Distributed Temperature Sensing Systems for a measurement of different ways in which the optical fibers are attached. Stimulated Brillouin Scattering served as a distributed system for this, because it can measure both the voltage and the temperature along optical fibres. The aim of this bachelor thesis is to ascertain how different ways of attachment of optical fibers influence its distortion. The influence of such a distortion was demonstrated experimentally in the Laborator of Transimission Media which is part of the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science on specially made apparatus. The final values of measurements are displayed in the tables and graphs.

Key words

Optical distributed system; DTS; DSTS; Stimulated Brillouin Scattering; optical fibers; Influence of Attachment of optical fibers

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
λ	nm	Vlnová délka
ω	Hz	Kruhová frekvence
ε	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	Velikost deformace

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
DTS	Distributed Temperature System	Distribuovaný teplotní systém
DSTS	Distributed Strain and Temperature System	Distribuovaný teplotní a napěťový systém
SRS	Stimulated Raman Scattering	Stimulovaný Ramanův rozptyl
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	Stimulovaný Brillouinův rozptyl
OTDR	Optical Time Domain Reflectometer	Metoda pro měření a analýzu optických tras

Obsah

Úvod.....	- 10 -
1 Popis rozptylu světla	- 11 -
1.1 Lineární rozptyl.....	- 11 -
1.1.1 Rayleighův rozptyl.....	- 11 -
1.1.2 Mieův rozptyl.....	- 13 -
1.2 Nelineární rozptyl.....	- 14 -
1.2.1 Brillouinův rozptyl.....	- 14 -
1.2.2 Ramanův rozptyl	- 16 -
2 Stimulované rozptyly	- 17 -
2.1 Stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS).....	- 17 -
2.2 Stimulovaný Ramanův rozptyl (SRS).....	- 18 -
3 Úvod do optických vláken a distribuované techniky snímání.....	- 19 -
3.1 Optická vlákna.....	- 19 -
3.1.1 Jednovidová optická vlákna	- 20 -
3.1.2 Mnohovidová optická vlákna	- 20 -
3.2 Optovláknové distribuované systémy	- 21 -
3.3 DSTS systém DITEST STA-R™.....	- 22 -
4 Praktická část	- 24 -
4.1 Cíle praktické části	- 24 -
4.2 Výběr optického vlákna a jeho kalibrace	- 24 -
4.3 Návrh přípravku na měření a možnosti uchycení optického vlákna	- 30 -
4.4 Realizace přípravku na měření.....	- 31 -
5 Měření vlivu uchycení optických vláken	- 37 -
Závěr	- 42 -
Použitá literatura	- 43 -
Seznam příloh.....	- 45 -

Úvod

Tématem této bakalářské práce bude zjistit, jaký vliv má uchycení optických vláken na měření pomocí DTS systému. Měření bude probíhat na DSTS přístroji, který pracuje na Brillouinově stimulovaném rozptylu a je schopen měřit teplotní profil a deformaci podél optického vlákna. Ve schopnosti měřit deformaci podél optického vlákna je tento přístroj výjimečný, a jelikož se nám naskytla možnost využití tohoto přístroje, tak jsme se právě deformaci optického vlákna rozhodli měřit.

Bakalářská práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části popisují rozptyl světla, jeho rozdělení na lineární a nelineární. V rámci lineárního rozptylu se věnuji Rayleighovu a Mieovu rozptylu a v rámci nelineárního rozptylu se zabývám Ramanovým a Brillouinovým rozptylem. Dále se zaobírám stimulovanými rozptyly světla (Ramanovým a Brillouinovým), protože na jejich principu je založeno fungování DTS a DSTS systémů. V práci jsou také popsána optická vlákna, jejich rozdělení na jednovidová a mnohovidová, dále také jejich vlastnosti a využití. Na tento popis navazují optovláknové distribuované systémy a DSTS systém pracující na Brillouinově stimulovaném rozptylu.

V praktické části se zaměříme na měření vlivu odlišného způsobu uchycení optického vlákna na jeho deformaci. Před samotným měřením bude nutné vybrat vhodné optické vlákno a provést jeho kalibraci. Kalibrace bude nutná z toho důvodu, abychom zjistili, zda je deformace optického vlákna lineární. Bude také potřeba sestavit přípravek na uchycení nekalibrovaného optického vlákna, ke kterému bude optické vlákno připevněno různými způsoby uchycení. Různé způsoby uchycení optického vlákna budeme zvažovat z hlediska jejich vlastností, u nichž předpokládáme odlišné vlivy na měření deformace. Předpokládáme, že největší rozdíly mezi jednotlivými uchyceními budou u odlišných struktur tvrdosti daných uchycení.

V další kapitole praktické části se budeme věnovat samotnému průběhu měření, zpracování naměřených hodnot a v neposlední řadě také výsledkům měření. Výsledky měření budou zpracovávány do grafů a tabulek, a také se pokusíme poukázat na případné největší rozdíly v deformaci optického vlákna způsobené odlišnými způsoby uchycení.

1 Popis rozptylu světla

Rozptyl světla je výrazem vzájemného působení záření s optickými nehomogenitami prostředí, které způsobují to, že se záření při rozptylu začne šířit jiným směrem než tím, kterým se původně šířil.

Rozptyl světla je podmíněn vlnovou délkou a frekvencí rozptýleného světla a dělíme jej na dva základní typy, na lineární a nelineární. Mezi lineární rozptyl řadíme Rayleighův rozptyl a Mieův rozptyl. Základní typy nelineárního rozptylu jsou Ramanův rozptyl a Brillouinův rozptyl. Hlavní rozdíl mezi lineárním a nelineárním rozptylem spočívá v tom, že zatímco u lineárního rozptylu se vlnová délka rozptýleného záření nemění, tak u nelineárního rozptylu ke změnám vlnové délky dochází [1].

Rozptyl světla je pro nás jako pro pozorovatele objektů nepostradatelným jevem, jelikož právě díky němu můžeme velké množství objektů makroskopicky pozorovat. Rozptyl světla má různé vlastnosti. Tyto vlastnosti se odvíjí od druhu povrchu, na němž se světlo rozptyluje. Jestliže je povrch matný, bude mít rozptyl odlišné vlastnosti než v případě povrchu nerovného. Vlastnosti rozptylu také určuje velikost částic daného povrchu.

Elektrické pole elektromagnetické vlny, které se šíří prostředím působí na elektrony atomů a molekul. Díky těmto elektronům jsou vyzařovány sekundární vlny. Pokud je prostředí homogenní, pak se rovinná světelná vlna šíří pouze v přímém směru, do stran se v tomto případě nerozptyluje. V ideálním homogenním prostředí se tedy světlo nerozptyluje, protože v něm platí podmínka rovnosti elektronů z hlediska jejich elementárního objemu. Pokud bychom tedy poskládali sekundární vlny v homogenním prostředí, tak výsledná světelná vlna by se šířila jen v přímém směru [2].

Pokud na rozptyl světla budeme nahlížet makroskopicky, tak bude determinovaný pouze nehomogenitou prostředí. Pokud je homogenita prostředí narušená, tak jako je tomu u vysoko kvalitního skla nebo u velmi čisté vody, tak rozptyl světla okem neuvidíme. Naopak rozptyl světla okem pozorujeme tehdy, jestliže jsou ve vodě přítomné bublinky vzduchu nebo malé rozptýlené částičky. Také ho můžeme vypožorovat, pokud jsou v daném prostředí rozptýlené částičky menší než je vlnová délka λ , které okem nevidíme, a takové prostředí nazýváme prostředím matným [3].

1.1 Lineární rozptyl

Pokud nastane lineární rozptyl světla, tak se rozptýlené světlo šíří se stejnou vlnovou délkou s jakou se šířilo před rozptylem.

1.1.1 Rayleighův rozptyl

Rayleighův rozptyl je procesem vzájemného působení světelného pulzu a materiálových nečistot. Zákonitosti rozptylu světla v matných prostředích poprvé experimentálně studoval J. Tyndall v roce 1869, ale poprvé tento rozptyl vysvětlil v roce 1899 J. W. Rayleigh.

„Ukázal, že velikost rozptýleného světla jako funkce souřadnice r Popis rozptylu světla a úhlu β tj. $I(r, \beta)$ je přímo úměrná čtvrté mocnině kruhové frekvence světelné vlny ω^4 . Jinak řečeno, intenzita rozptýleného světla je nepřímo úměrná čtvrté mocnině vlnové délky λ^4 “ [2].

Z předchozí věty můžeme konstatovat, že krátkovlnné záření se rozptyluje více, a to díky tomu, že při rozptylu bílého světla v matném prostředí má rozptýlené světlo modrý odstín

a světlo, které projde v tomto prostředí určitou vzdáleností má červený nádech. Pokud dopadá na rozptylující prostředí monochromatické světlo takové vlnové délky, která nebude pohlcena vzorkem a nemůže tedy dovést elektron do excitovaného stavu, tak při rozptylu nedojde ke změně vlnové délky λ (nebo kruhové frekvence ω). Tento rozptyl bez změny frekvence se nazývá Rayleighův rozptyl [2].

Absenci změny frekvence, která je přítomna u Rayleighova rozptylu, můžeme vysvětlit na základě fungování principu monochromatického záření. Monochromatické záření může rozkmitat nepolární molekulu složky, a ta díky působení elektrického pole polarizuje a vytvoří indukovaný dipól. Na základě vytvoření se tohoto dipólu na molekulu působí i elektromagnetické záření. Tento dipól se rozkmitá s takovou frekvencí, se kterou právě kmitá elektrická i magnetická složka záření. Tak dochází k přenosu energie z fotonu na molekulu. Tuto získanou energii, však molekula ihned ztrácí, a to kvůli tomu, že (...) „vyzařuje záření stejné frekvence, ale nižších amplitud do všech směrů a vrací se do původního energetického stavu“ [4].

Jako příklad Rayleighova rozptylu můžeme uvést rozptyl slunečního záření v čisté atmosféře a na tomto fyzikálním principu je založena metoda pro měření a analýzu optických tras, kterou nazýváme Optical Time Domain Reflectometer (OTDR).

Rayleighova rovnice:

$$i_o = I_o \frac{\pi^2}{\epsilon_0^2} \frac{\alpha^2}{\lambda^4} \frac{F(\theta)}{r^2} \quad (1.1)$$

i_o -intenzita světla rozptýleného jednou částicí pod úhlem Θ

I_o – celková intenzita dopadajícího záření

ϵ_0 – permitivita vakua ($8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ J}^{-1} \text{ m}^{-1}$)

α – polarizovatelnost částice

λ – vlnová délka primárního záření v daném prostředí

θ – úhel pozorování, tj. úhel sevřený primárním paprskem a paprskem rozptýleného světla

$F(\theta)$ – je funkce úhlu pozorování, jejíž tvar závisí na charakteru primárního paprsku (polarizace) [5].

V optických vláknech má Rayleighův rozptyl velký vliv na materiálové ztráty. Tyto ztráty jsou způsobeny absorpcí a rozptylem světla. Rayleighův rozptyl v optických vláknech vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky a je stěžejním jevem, protože hlavně on vyvolává rozptyl záření u optických vláken. „*Jedná se o rozptyl záření na nehomogenitách rozměrově menších než je vlnová délka optického záření.*“ Tyto nehomogenity se ukazují jako výkyvy indexu lomu prostředí (oxidu křemíku SiO₂), a jsou implikací nehomogenity hustoty a struktury skla při tuhnutí. Nehomogenity jsou základními vlastnostmi a nelze je odstranit, avšak jsou natolik malé, že vyvolávají jen minimální ztráty. Velikost útlumu lze určit vztahem:

$$\alpha_R = \frac{C_1}{\lambda^4} \quad (1.2)$$

Kde: C₁ je koeficient Rayleighova rozptylu, který je parametrem každého materiálu (C₁ křemenného skla je 0, 802.10⁻²¹) [6].

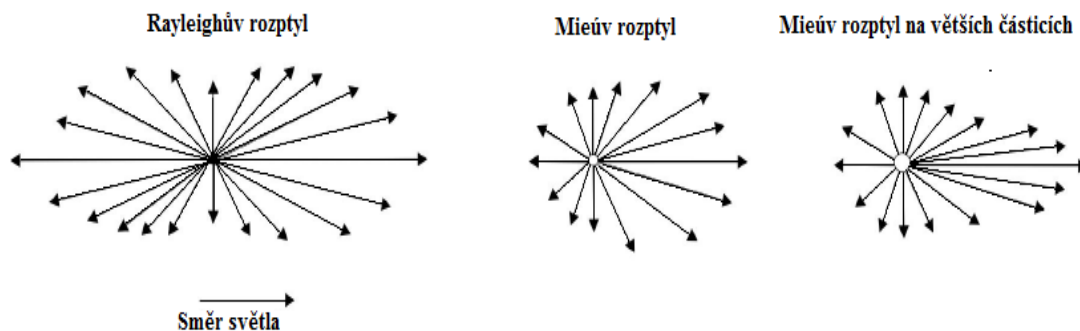
1.1.2 Mieův rozptyl

Objevitelem Mieova rozptylu je německý fyzik Gustav Mie.

Mieův rozptyl vzniká na nehomogenitách srovnatelných s vlnovou délkou světla. Má rozsáhlou úhlovou závislost. Tento rozptyl vzniká díky mikroskopickým bublinkám ve vlákne, napětí ve vlákne, fluktuaci průměru jádra, nečistotám ve vlákne a dalším aspektům srovnatelných s vlnovou délkou. V optických vláknech je tento rozptyl způsoben především nedokonalostmi ve výrobě [7].

Mieův rozptyl je oproti Rayleighovu rozptylu obecnější, platí pro všechny poměry poloměrů k vlnové délce záření. Matematický popis pro Mieův rozptyl je náročnější než matematický popis pro Rayleighův rozptyl. Pokud je to možné, a pokud jsou splněny podmínky pro Rayleighův rozptyl, tak se častěji používá právě tento druh rozptylu, je však méně přesný než Mieův rozptyl.

Na Obr. 1.1 je vidět, že při Mieově rozptylu se světlo rozptyluje především po směru světla. Pokud se poloměr rozptylovaného světla zvětšuje, o to více se světlo koncentruje dopředu. Oproti tomu u Rayleighovu rozptylu se rozptýlené světlo koncentruje stejnou mírou jak ve směru světla, tak i ve směru v opačném [8].



Obrázek 1.1: Rayleighův a Mieův rozptyl

1.2 Nelineární rozptyl

„Jedná se o tzv. nelineární útlumové mechanismy, které vznikají při vyšších hustotách optického výkonu v optických vláknech.“ Tento rozptyl zapříčiňuje přechod optického výkonu z jednoho vidu do jiného. Tento výkon se poté bude šířit buď to stejným, nebo opačným směrem a také s jinou frekvencí (vlnová délka vzhledem k primárnímu zdroji záření). Je tedy zřejmé, že nelineární rozptyl bude záležet na hodnotě hustoty optického výkonu v optických vláknech. Ke vzniku nelineárního rozptylu je zapotřebí, aby jeho hodnota přesáhla prahovou hodnotu optického výkonu [9].

1.2.1 Brillouinův rozptyl

Brillouinův rozptyl byl poprvé teoreticky popsáný L. Brillouinem a S. Mandelštamem.

Brillouinův rozptyl je interakcí světelného pulzu s tepelně nabuzenými akustickými vlnami (tzv. akustické fonony). Elektromagnetická (světelná) vlna je schopna se v kapalině nebo plynu sjednotit s ostatními druhy vln, například s akustickými. Akustické vlny prostřednictvím pružné deformace prostředí mohou mírně modifikovat index lomu. Odpovídající pohybující se mřížka odráží zpět malé množství dopadajícího světla a mění jeho frekvenci (nebo vlnovou délku) kvůli Dopplerovu jevu (změna vlnové délky a frekvence přijímaného oproti vysílanému signálu je způsobena vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače).

Posun frekvence závisí na rychlosti akustické vlny, kdežto znaménko závisí na směru šíření se akustické vlny. Kolem dopadajícího světla je Brillouinův zpětný rozptyl vytvořen ve dvou různých frekvencích, nazýváme je Stokesovy a Anti-Stokesovy složky. Ve vláknech SiO₂ je Brillouinův posun frekvence v rozpětí 10GHz (0,1 nm při vlnové délce 1550 nm) a je závislý na teplotě a tlaku [10].

Akustické vlny v optických vláknech jsou ovlivňovány tepelnými vibracemi molekul. Tento jev je v nelineárním prostředí třetího řádu a je spojen se šířením akustické vlny v optickém vlákne.

Pokud na rozptyl budeme nahlížet jako na kvantově-mechanickou interakci akustické a optické vlny, tak světlo, které se šíří, si můžeme představit jako soubor fotonů – částic s energií jednoho fotonu:

$$E_F = \hbar \cdot \omega_F \quad (1.3)$$

a impulzem

$$P_F = \hbar \cdot k_F \quad (1.4)$$

Kde:

ω_F – je kruhová frekvence světelné vlny

k_F - je její vlnový vektor

$\hbar = h / 2\pi$ – je redukovaná Planckova konstanta

Na akustickou vlnu nahlížíme jako na soubor fononů (částic s energií):

$$E_A = \hbar\omega_A \quad (1.5)$$

a impulzem

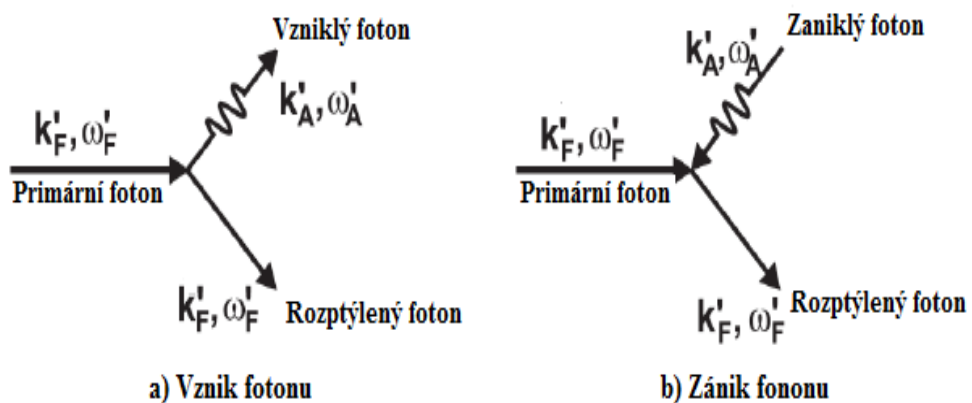
$$P_A = \hbar \cdot k_A \quad (1.6)$$

Kde:

ω_A je kruhová frekvence akustické vlny

k_A je její vlnový vektor.

Z pohledu kvantové mechaniky se na vzájemné působení světelné vlny s látkou nahlížíme jako na proces, kdy díky jednomu fotonu vznikne jeden foton a jeden fonon a opačně; foton a fonon dají vzniknout novému fotonu. Tyto dva průběhy jsou zobrazeny na obr. 1. 2.



Obrázek 1.2: Vznik a zánik fononu

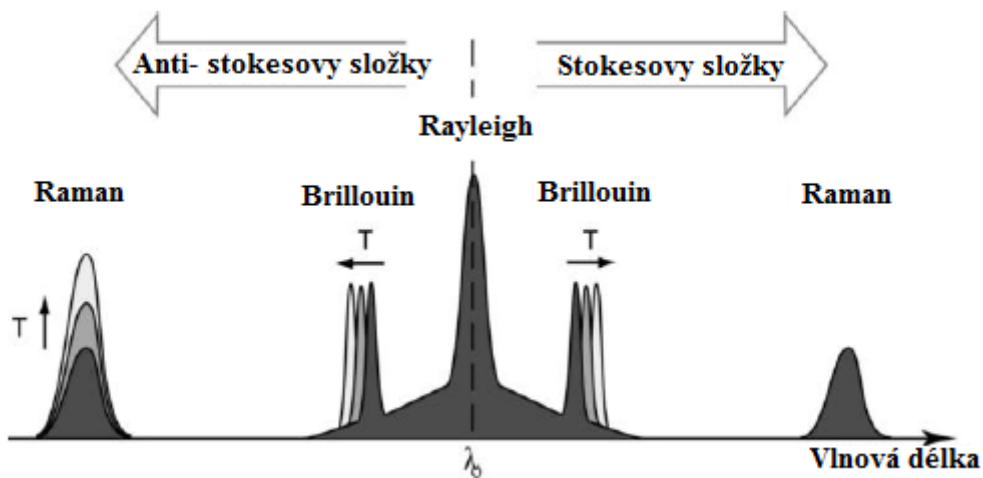
Pokud se v procesu vzájemného působení světla s fonony účastní optické fonony, pak se jedná o Ramanův rozptyl. Pokud se jedná o fonony akustické, tak mluvíme o rozptylu Brillouinově [2].

1.2.2 Ramanův rozptyl

Tento rozptyl byl uveřejněn v roce 1928 C. V. Ramanem, který za jeho objev dostal později Nobelovu cenu.

Ramanův rozptyl představuje vzájemné působení světelného pulzu s teplotně nabuzenými atomovými nebo molekulovými vibracemi. Jestliže se srazí foton vstupujícího záření s molekulou dané látky, dojde k rozptylu záření. Část původního záření (zhruba 10^{-8}) se zúčastní nepružných srážek fotonu s molekulou. Dopadající foton buď část své energie předá molekule, nebo od ní naopak část energie přijme. Z tohoto důvodu bude mít takto vzniklé rozptýlené záření odlišnou frekvenci od původního záření, což je podstatou Ramanova rozptylu. [2] Můžeme mluvit o velkém posunu frekvence, u vláken SiO_2 je tento posun typicky 13 THz, což odpovídá přibližně 100 nm při vlnové délce 1550 nm. Intenzita Ramanových Anti-Stokesových složek je závislá na teplotě, kdežto Stokesovy složky jsou na teplotu téměř necitlivé [10].

Obrázek 1.3 schematicky znázorňuje spektrum zpětně odražených rozptylů generovaných v každém bodě optického vlákna.



Obrázek 1.3: Schematické zobrazení jednotlivých rozptylů [10]

2 Stimulované rozptyly

Mezi stimulované rozptyly patří stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS) a stimulovaný Ramanův rozptyl (SRS).

Zásadní rozdíl mezi těmito dvěma rozptyly je, že SBS se účastní akustické fonony, kdežto SRS probíhá prostřednictvím optických fononů. V důsledku tohoto rozdílu se SBS vyskytuje pouze v jednom směru, tj. dozadu, zatímco SRS může nastat v obou směrech (dopředu i dozadu).

Ve skutečnosti oba stimulované rozptyly (SBS nebo SRS) poskytují optické zisky, ale s posuny frekvence [11].

2.1 Stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS)

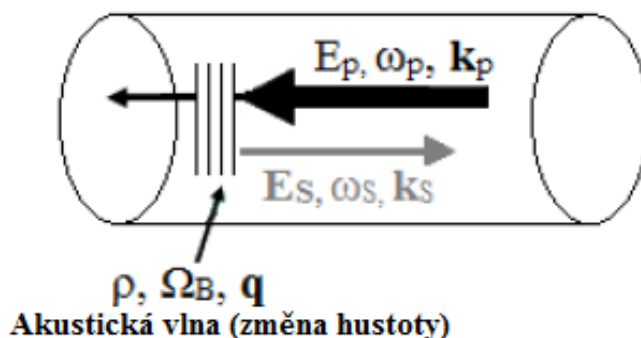
Brillouinův rozptyl je v praxi použitelný, až jako stimulovaný Brillouinův rozptyl (SBS).

Jedná se o nelineární proces vyvolaný v optických vláknech při velké intenzitě rozptylu. Brillouinův rozptyl může být stimulovaný druhým optickým signálem, který splňuje specifické podmínky. Těch je dosaženo tehdy, pokud se Stokesovo záření šíří proti pumpovacímu signálu. Stimulace je maximální v okamžiku, kdy frekvence Stokesova signálu a frekvence pumpovacího signálu jsou přesně odděleny Brillouinovým posunem. Brillouinův posun je původně způsobený interakcí akustického fotonu a fononu. V tomto případě dojde k přenosu energie z pumpovaného signálu do Stokesova, a tím dojde ke zvýšení intenzity zpětného rozptylu, tudíž k většímu poměru signál/šum.

Brillouinův posun frekvence odpovídá rozdílu frekvence mezi pumpovacím a Stokesovým signálem, který utvoří maximální Brillouinův zisk a větší zesílení Stokesova signálu. Profil Brillouinova zisku koresponduje s Brillouinovým ziskem hodnot v každé měřené pozici podél snímaného vlákna. Zisk je zpravidla udáván v procentech. Profil Brillouinovy frekvence odpovídá frekvenci hodnoty v každém měřeném bodě podél snímaného vlákna [10].

Stimulovaný Brillouinův rozptyl tedy nastane při vzájemném působení dvou proti sobě šířících se laserových svazků, jde o pumpovací a Stokesův laserový svazek, přičemž akustická vlna se šíří ve směru vlny Stokesovy (proti směru pumpovacího svazku).

Na obrázku 2.1. je zobrazen Brillouinův stimulovaný rozptyl v optickém vlákne, kdy pumpovací světelný svazek o amplitudě E_p , frekvenci ω_p a vlnovém vektoru k_p se rozptýlí o ustupující zvukovou vlnu o amplitudě p , frekvenci Ω_B a vlnovém vektoru q . Tento rozptýlený svazek vytvoří rozptýlenou vlnu o amplitudě E_s , frekvenci ω_s a vlnovém vektoru k_s [12].



Obrázek 2.1: Brillouinův stimulovaný rozptyl v optickém vlákně [4]

2.2 Stimulovaný Ramanův rozptyl (SRS)

Stimulovaný Ramanův rozptyl (SRS) je důležitý nelineární proces, který je u optických vláken využitelný u širokopásmových ramanovských zesilovačů a laditelných ramanovských laserů. Také může přenosem energie z jednoho kanálu do sousedních kanálů výrazně omezit výkon multikanálových optických komunikačních systémů.

U mnoha nelineárních procesů spontánní Ramanův rozptyl převádí malý zlomek výkonu z jednoho optického paprsku na druhý, při posunu frekvence o hodnotu, která je určena vibračním stavem daného média. Tento proces se nazývá Ramanův jev a je popsán kvantově-mechanicky jakožto rozptyl dopadajícího fotonu přes molekulu na foton nízké frekvence, kdy ve stejném okamžiku molekula vytváří přechod mezi vibračními stavy. Dopadající světlo působí jako „pumpa“, která generuje frekvenční posun světla nazývaný Stokesova vlna. Díky velké intenzitě pumpovacích vln, byl v roce 1962 objeven nový jev stimulovaného Ramanova rozptylu. Ten může nastat, když Stokesovy vlny v optickém vlákně rapidně rostou, a to až v takovém rozměru, že se v optických vláknech objeví i většina pumpované energie [13].

Stimulovaný Ramanův rozptyl vzniká následkem vzájemného působení optického záření a vysokofrekvenční vibrační složky prostředí (materiálu vlákna). Nejjednodušší popis Ramanova stimulovaného rozptylu je kvantově mechanický model. Kromě kvantově mechanického modelu Ramanova rozptylu je zde i popis založený na indukci dipólového momentu molekuly, která je podřízena kmitání (oscilaci) elektrického pole nabuzeného /excitovaného záření. Tento indukovaný dipól μ_i je pak zdrojem rozptýleného záření, a to je přímo úměrné intenzitě elektrického pole E .

$$\mu_i = \alpha \cdot E \quad (2.1)$$

Podíl koeficientu alfa se nazývá koeficient elektrické polarizovatelnosti. Stanovuje, jak moc je možné změnit náboj vzorců. Tento koeficient představuje účinnost elektrického pole vyvolat dipólový moment v molekule. Protože vektor μ_i má jiný směr než vektor E , elektrická polarizovatelnost není skalární veličina, ale jedná se o tenzor reprezentovaný symetrickou maticí [14].

3 Úvod do optických vláken a distribuované techniky snímání

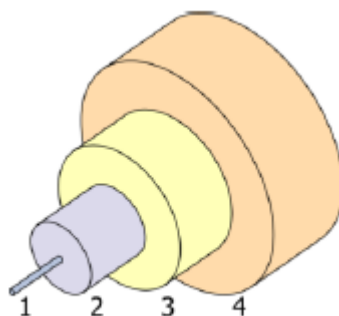
3.1 Optická vlákna

Optické vlákno je tvořeno jádrem, ve kterém se šíří světlo. Jádro je obklopeno obalem, který jej chrání. Ochranný plášť je tvořen plastem nebo v případě potřeby silným kovovým obalem. Takto popsaná konstrukce optického vlákna je zobrazena na obrázku 3.1.

Moderní senzory založené na optických vláknech vděčí za svůj rozvoj dvěma nejdůležitějším vědeckým průlomům, a to konkrétně laseru (1960) a moderním, nízko ztrátovým optickým vláknům (1966). Od počátku roku 1970 se nízko ztrátová optická vlákna používala nejen v telekomunikaci, což byla primární motivace pro jejich rozvoj, ale také se začala využívat v rámci snímání.

Optická vlákna jako snímače jsou kompaktní, jejich hmotnost je nízká a obecně jsou minimálně invazivní. Nabízí možnost být mnohonásobně efektivní na jednotlivé optické síti nebo mohou být přizpůsobena k vykonávání distribuovaných měření. Kromě toho, jsou také imunní vůči elektromagnetickému rušení. Díky provedeným experimentům a praktické aplikaci se potvrdilo, že optická vlákna jako senzory mohou obstát i ve velmi drsných podmínkách, např. v rámci ropného a plynárenského průmyslu, ve stavebním, mechanickém inženýrství apod.

Na obrázku 3.1 můžeme vidět konstrukci jednovidového optického vlákna: jádro- $9\mu\text{m}$ (1), obal- $125\mu\text{m}$ (2), ochranný plášť- $250\mu\text{m}$ (3) a volitelný ochranný materiál- $400\mu\text{m}$ (4) [10].



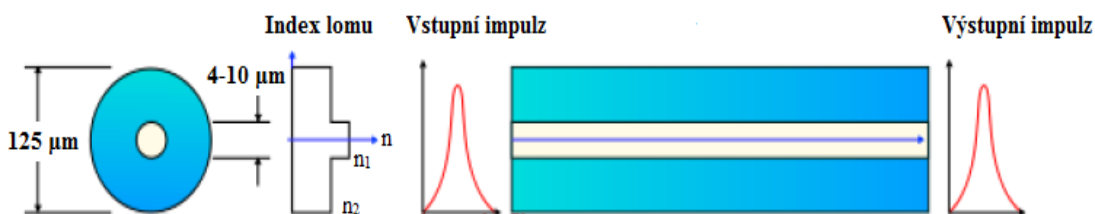
Obrázek 3.1: Konstrukce jednovidového optického vlákna [10]

Z hlediska přenosu světelných paprsků dělíme optická vlákna na dva typy. Jednovidové optické vlákno a mnohovidové optické vlákno. Základní rozdíl mezi jednovidovým a mnohovidovým optickým vláknem spočívá v rozměru jejich jádra (rozměru prostředí, kterým se přenáší optické záření). Dalším rozdílem je pak také to, že v jednovidovém vlákně se šíří pouze jeden paprsek (vid), kdežto v mnohovidovém vlákně se šíří více paprsků (vidů) [15].

3.1.1 Jednovidová optická vlákna

Jednovidová optická vlákna jsou schopna vést jediný paprsek (vid) bez odrazů, tato skutečnost je dosažena díky velmi malým průměrům jádra optického vlákna (4-10 μm). Paprsek se šíří ve směru jeho osy bez odrazů (obrázek 3.2.). Takto šířícímu se paprsku napomáhá také značně malý poměr indexu lomu jádra a pláště. Jako materiál pro jednovidová optická vlákna v oblasti vlnových délek 850 nm až 1600 nm se používá sklo s vhodnými příměsemi.

Tato vlákna jsou používána tehdy, když je požadována velká šířka pásma a malý útlum. Oproti ostatním vyráběným optickým vláknům mají jednovidová optická vlákna největší šířku pásma a nejmenší útlum. Z tohoto důvodu se používají výhradně pro přenos informací na velké vzdálenosti [15]



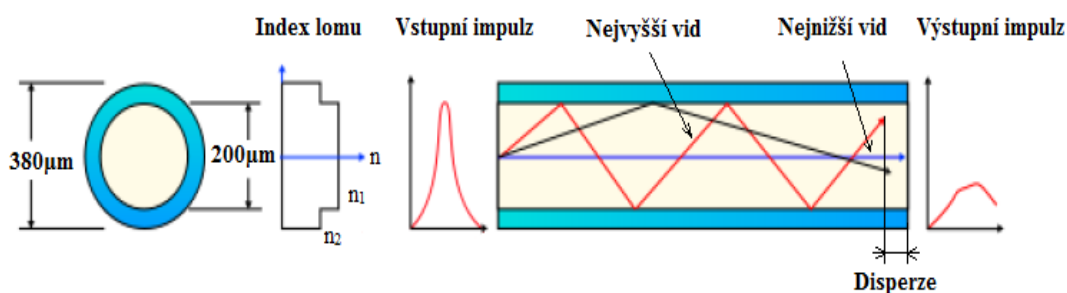
Obrázek 3.2: Princip přenosu paprsku jednovidovým optickým vláknem [10].

Hlavní vlastnosti jednovidových optických vláken:

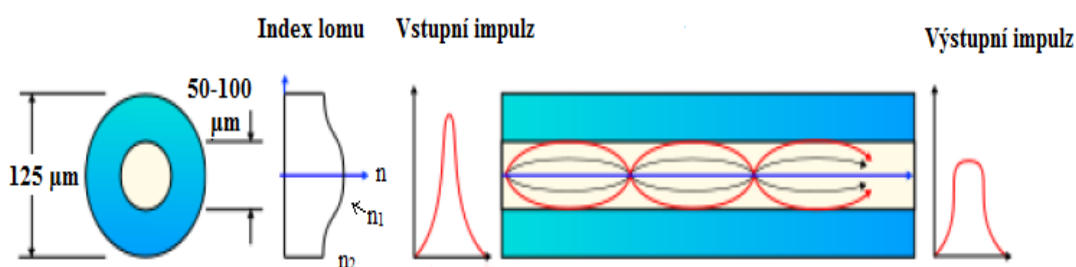
- vysoká věrnost přenosu světelných impulsů na velké vzdálenosti (schopnost přenášení velkého objemu informací);
- malý útlum;
- absence vidové disperze;
- velká šířka pásma;
- nízká hodnota numerické apertury;
- zdroj optického záření- laserová dioda [15].

3.1.2 Mnohovidová optická vlákna

Tento druh optických vláken se od jednovidových vláken liší hlavně průměrem jádra. Vyrábí se o průměrech od 50 μm až do 200 μm . Výhodou těchto průměrů jsou nižší náklady na výrobu a snadnější spojování těchto vláken. Mnohovidová vlákna se dělí podle toho, jak vedou paprsek, jinak řečeno jak se mění index lomu. Tyto vlákna tedy dělíme na mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu (obrázek 3.3) a na mnohovidová vlákna s gradientní (postupnou) změnou indexu lomu (obrázek 3.4) [15].



Obrázek 3.3: Mnohovidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu [10].



Obrázek 3.4: Mnohovidové optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu [10]

Hlavní vlastnosti mnohovidových optických vláken:

- přenos dat omezen vidovou disperzí;
- ve srovnání s jednovidovými vlákny větší útlum;
- vyšší hodnota numerické apertury => snadnější navazování světla do vlákna;
- jako zdroj světla možnost použití LED diod;
- nižší cena optického spoje [15].

3.2 Optovláknové distribuované systémy

Optovláknový senzor využívá optické vlákno jako snímací prvek. Tyto senzory můžeme rozdělit do tří kategorií:

- Bodové senzory – pouze jedno místo podél optického vlákna je citlivé na měřené veličiny (teplota, tlak, napětí, atd.). Měření probíhá prostřednictvím lokálního interferometru.
- Zdánlivě distribuované nebo multiplexní senzory – používají se pro snímání mnoha bodů, které jsou vzájemně a mnohonásobně propojeny pomocí optického vlákna za použití

odlišných vlnových délek pro každý senzor, nebo pro snímání časového zpoždění procházejícího světla podél vlákna skrze každý senzor.

- Distribuované nebo plně distribuované senzory – optické vlákno je dlouhý nepřerušovaný lineární senzor. Měřená veličina je získána z analýzy zpětně odraženého světla.

Distribuované senzory jsou navrženy tak, že informace je udržována v prostorovém módu, a poté může být měřená veličina lokálně identifikovaná podél délky samotného vlákna. Poloha měření je možná skrze koncept „modifikovaného radaru“ užitím optických pulsů vyslaných ve snímaném vlákně.

Zaznamenáváme funkci času doby šíření pulzu skrze vlákno a vliv měřené veličiny na optické impulzy v rámci vlákna. Rychlost světla v rámci optického vlákna známe. Časové zpoždění mezi pulzem a detekcí účinku měřené veličiny poskytuje přímé informace o lokaci interakce: další interakce probíhá ve snímacím vlákně, delší bude časové zpoždění mezi vysílaným pulzem a detekcí interakce. Jedno jediné vlákno může přemístit tisíce bodových senzorů, a to právě díky konceptu distribuovaného snímání [10].

3.3 DSTS systém DITEST STA-R™



Obrázek 3.5: *Optovláknový distribuovaný systém DITEST STA-R™*

Parametry přístroje DITEST STA-R™:

- dva nezávislé kanály;
- typ měřeného vlákna: klasické jednovidové optické vlákno;
- měřená vzdálenost: do 50 km;
- prostorové rozlišení: 1m při 20km, 2m při 30km, 3m při 50km;
- počet bodů: 100 000;
- měřené hodnoty: Napětí, Brillouinův frekvenční posuv, Brillouinův zisk a šířka;
- teplotní rozlišení: 0,1°C (-273°C až 700°C);
- rozlišení tlakového napětí: 2με;
- doba měření: 1-2min, pro vyšší rozlišení vzorků 5-10min.

Uživatelské rozhraní DITEST STA-R™ běží na systému Windows XP™. Operační systém je nainstalovaný v distribuovaném systému a je nezbytný pro fungování přístroje.

Tento systém DSTS (Distributed Strain Temperature System) je schopen měřit teplotu, délku optického vlákna, a také mechanické napětí podél optického vlákna. V rámci jednoho měření nám systém pro distribuované měření napětí (deformace) a teploty umožňuje měřit několik tisíc bodů v tomto jednovidovém optickém vlákně. DSTS systém je založen na měření optické interakce, a to na principu stimulovaného Brillouinova rozptylu (SBS). Jedná se o vnitřní fyzikální vlastnost optického vlákna a poskytuje nám důležité informace o teplotě a napětí měřeného optického vlákna. Jako senzor využívá jednovidové optické vlákno, které může být měřeno až do vzdálenosti 50 km. Charakteristika stimulovaného Brillouinova rozptylu je měřena díky inovativní a stabilní konfiguraci. Tato konfigurace je založena na Brillouinově optické časové doméně.

Tento systém používá jeden laserový zdroj. Umožňuje periodické měření bez jakékoliv předběžné kalibrace. Také je schopen současně měřit teplotu i tlakové namáhání. Měření tlakového namáhání je teplotně závislé. Optická vlákna nebo kabely mohou být připojeny k DSTS systému a můžeme je měřit automaticky pomocí integrovaného optického prepínače. Přístroj je schopen pracovat dlouhodobě bez jakékoliv obsluhy.

Naměřené hodnoty jsou automaticky zaznamenávány a ukládány v databázi, aby byly dostupné pro další analýzu. Tyto hodnoty lze exportovat do různých formátů, jak ve formě textového souboru nebo aplikace Excel, tak i v grafické podobě. Součástí tohoto přístroje je také program DITEST Data Viewer, který je možné nainstalovat na jakýkoliv klientský počítač, pomocí něhož můžeme grafická data dále zpracovávat. K této databázi se také můžeme připojit pomocí vzdálené plochy přes LAN síť. Na obrázku 3.2 můžete vidět DSTS systém pracující na stimulovaném Brillouinově rozptylu [10].

4 Praktická část

4.1 Cíle praktické části

Cílem praktické části bakalářské práce bylo zjistit, zda mají odlišné způsoby uchycení optických vláken vliv na deformaci optického vlákna. Pokud odlišné způsoby uchycení mají skutečně vliv na deformaci optického vlákna, tak cílem bylo také poukázat na rozdíly těchto naměřených hodnot.

Deformace optického vlákna byla měřena pomocí zcela nového distribuovaného systému DITEST STA-R™, což je DSTS (Distributed Strain Temperature System), který pracuje na stimulovaném Brillouinově rozptylu. Díky tomu, že tento přístroj byl pro nás zcela nový, mohli jsme realizovat náš primární cíl a zároveň zjistit, jakými možnostmi tento přístroj disponuje.

Praktická část této práce se skládá dohromady ze tří částí a dvou kapitol. První část se věnuje výběru optického vlákna a jeho kalibraci. Druhá část obsahuje popis návrhu přípravku na měření a možnosti uchycení optického vlákna. Ve třetí části této praktické práce se zabýváme realizací přípravku na měření a jeho kalibrací.

Samotným měřením se pak zabývá pátá kapitola, kde jsou ukázány hodnoty naměřené deformace optického vlákna na přípravku na měření pomocí DSTS přístroje.

4.2 Výběr optického vlákna a jeho kalibrace

Před samotnou aplikací optického kabelu na desku bylo nutné dané optické vlákno nejprve kalibrovat, zjistit o kolik se při určité délce natažení optického vlákna zvedne hodnota deformace. Tato velikost deformace se popisuje pomocí veličiny strain (ε).

Velikost strainu se vypočítá ze vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} [\varepsilon] \quad (4.1)$$

Kde: ε je hodnota deformace (strainu)

ΔL je hodnota velikosti prodloužení [mm]

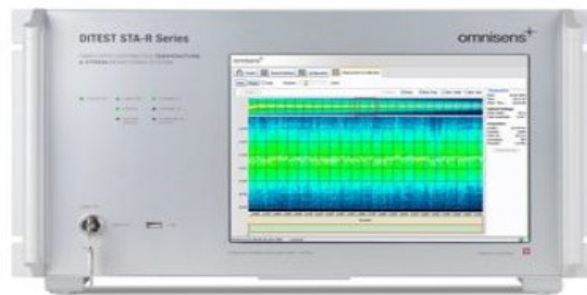
L je původní délka optického vlákna (před působením deformace) [mm]

Protože je hodnota deformace příliš malá, obvykle se tato hodnota vynásobí 10^6 a vyjadřuje se v jednotkách $\mu\varepsilon$ (microstrain) [16].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \cdot 10^6 [\mu\varepsilon] \quad (4.2)$$

Dalším důvodem kalibrace bylo zjištění Brillouinovské frekvence (hodnoty Offset), a také bylo nutné proměřit, zda jsou hodnoty deformace optického vlákna lineární. Jako optický kabel byl zvolen klasický jednovidový telekomunikační kabel G.652.D.

Kalibrace tohoto kabelu byla provedena na přístroji DITEST STA-R™, což je vysoce výkonný optovláknový distribuovaný systém určený pro analyzování teplotního a tlakového namáhání optických vláken. Tento přístroj pracuje na principu stimulovaného Brillouinova rozptylu (SBS).



Obrázek 4.1: DSTS systém DITEST STA-R™ [10]

Dále byl při kalibraci použitý přípravek pro uchycení optického vlákna pro měření síly v tahu (obrázek 4.2), jehož součástí byl také siloměr FG 6005 D. Přípravek byl sestaven z hliníkového *U* profilu a skládal se ze dvou částí. První část tvořily dvě hliníkové destičky, na těchto destičkách byly z vnitřní strany přilepeny gumové pásy, do těchto gumových pásu bylo přichyceno pomocí čtyř šroubů měřené optické vlákno. Druhá část tohoto přípravku byla posuvná, tento posuv byl zajištěn držkou, která zajišťovala vzájemný posuv. Součástí této posuvné části byl také mikrometrický šroub. Pomocí tohoto šroubu byl zajištěn velmi přesný posuv.



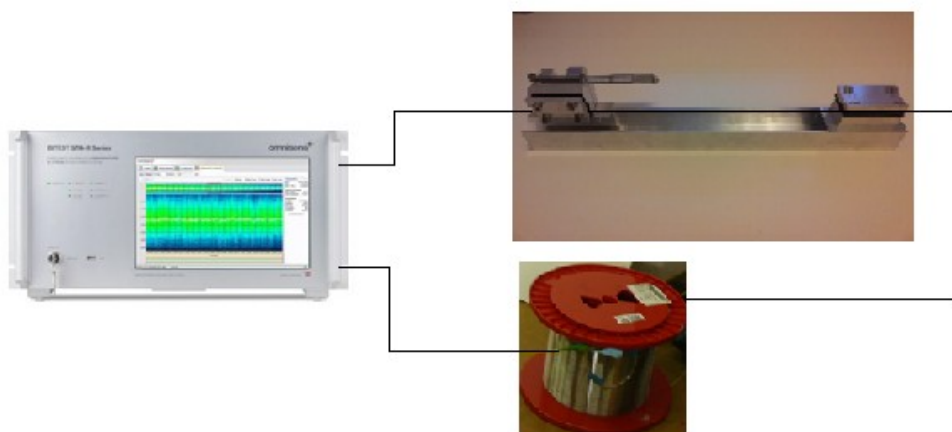
Obrázek 4.2: Přípravek pro uchycení optického vlákna pro měření síly v tahu [17]

Při kalibraci bylo také nutné použít cívku předřadného jednovidového vlákna, protože DSTS systém DITEST STA-R™ je navržen tak, aby měřil pouze první polovinu připojené trasy. Z tohoto důvodu bylo nutné použít cívku předřadného vlákna.



Obrázek 4.3: Cívka předřadného vlákna

Do přípravku pro uchycení optického vlákna pro měření síly v tahu (obrázek 4.2) jsme připevnili 585 mm jednovidového telekomunikačního vlákna G.652.D. Z jedné strany bylo toto vlákno pomocí pigtailu, jehož součástí je konektor E2000, propojeno napřímo s DSTS přístrojem (obrázek 4.1). Z druhé strany bylo vlákno spojeno s předřadným vláknem (obrázek 4.3), a poté, opět pomocí pigtailu a konektoru E2000 spojeno s DSTS přístrojem (obrázek 4.1). Celkové schematické zapojení kalibrace optického vlákna je zobrazeno na obrázku 4.4.



Obrázek 4.4: Schematické zapojení kalibrace optického vlákna

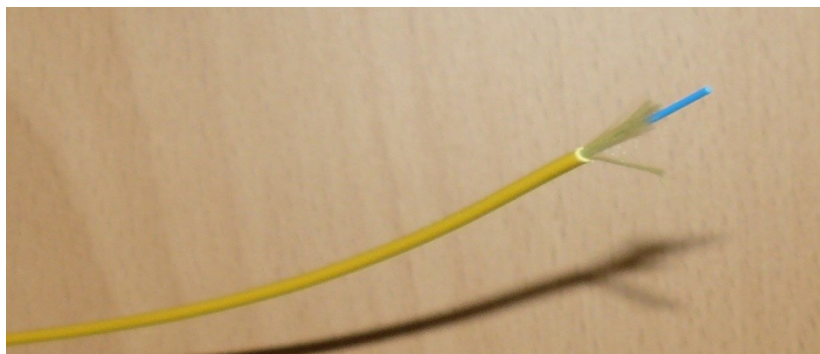
Samotná kalibrace probíhala tak, že připevněné vlákno bylo v přípravku na upevnění optického vlákna pomocí mikrošroubu natahováno, a to po krocích 0,5 mm, až do prodloužení vlákna o 4,5 mm na celkové délce 585 mm. Při kalibraci jsme tedy optické vlákno natáhli (zdeformovali) z původní délky 585 mm na délku 589,5 mm.

Při prvním natažení optického vlákna o 0,5 mm jsme hodnotu microstrainu vypočítali ze vzorce (4.2). Tuto hodnotu jsme zadali jako počáteční do DSTS systému. Při každém dalším měření DSTS systém hodnotu microstrainu naměřil. Měření probíhalo po každém prodloužení vlákna o 0,5 mm. Síla tahu napínaného vlákna, naměřené a vypočtené hodnoty deformace (microstrainu) jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: *Optický kabel G.652.D s aramidovým opletením a PVC obalem*

Prodloužení vlákna [mm]	Síla tahu napínaného vlákna [N]	Výpočet microstrainu [$\mu\epsilon$]	Naměřený microstrain [$\mu\epsilon$]
0,0 (585,0 mm)	0,47		
0,5 (585,5 mm)	1,36	854,70	Zadaný do DSTS
1,0 (586,0 mm)	6,71	1709,40	1341,12
1,5 (586,5 mm)	14,91	2564,10	1902,14
2,0 (587,0 mm)	24,03	3418,80	2641,41
2,5 (587,5 mm)	33,76	4273,50	3156,53
3,0 (588,0 mm)	38,09	5128,21	3437,56
3,5 (588,5 mm)	37,73	5982,91	3474,73

Jak je vidět v tabulce 4.1, tak telekomunikační vlákno G.652.D s PVC obalem a aramidovým opletením bylo prodlouženo pouze o 3,5 mm. A to z toho důvodu, že vlákno s tímto typem ochrany nebylo možné více natáhnout (zdeformovat). Tento fakt způsobila přítomnost aramidového opletení, která větší deformaci optického vlákna znemožnila. V tabulce je také zaznamenána síla v [N], která působila na optické vlákno při jeho deformaci. Tato hodnota se do prodloužení 2 mm zvedala přiměřeně lineárně, ale od prodloužení optického vlákna o 2,5 mm se síla, která působila na optické vlákno v [N] měnila jen nepatrně, protože se díky přítomnosti aramidového opletení optické vlákno už neprodlužovalo, ale prodlužoval se pouze PVC obal, který byl součástí tohoto telekomunikačního kabelu. Z tohoto důvodu se neshodují hodnoty naměřené a vypočítané microstrainu.



Obrázek 4.5: Optický kabel G.652.D s aramidovým opletením a PVC obalem

Pro ověření jsme měření optického kabelu opakovali. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Opakované měření optického kabelu G.652.D s aramidovým opletením a PVC obalem

Prodloužení vlákna [mm]	Síla tahu napínaného vlákna [N]	Výpočet microstrainu [$\mu\epsilon$]	Naměřený microstrain [$\mu\epsilon$]
0,0 (585,0 mm)	0,22		
0,5 (585,5 mm)	1,69	854,70	Zadaný do DSTS
1,0 (586,0 mm)	7,80	1709,40	1523,91
1,5 (586,5 mm)	16,00	2564,10	2257,38
2,0 (587,0 mm)	26,7	3418,80	2903,84
2,5 (587,5 mm)	36,64	4273,50	3475,28
3,0 (588,0 mm)	38,09	5128,21	3462,12
3,5 (588,5 mm)	37,92	5982,91	3484,15

Z těchto naměřených výsledků jsme usoudili, že telekomunikační vlákno G.652.D s aramidovým opletením a PVC obalem nebylo vhodné pro měření vlivu uchycení optických vláken pomocí DSTS systému.

Z předchozích měření jsme zjistili, že přítomnost aramidového opletení a PVC obalu má negativní vliv na měření deformace (microstrainu) pomocí DSTS systému. Z tohoto důvodu jsme ze stejného jednovidového telekomunikačního kabelu G.652.D, toto aramidové opletení

a PVC obal odstranili. V dalším měření jsme tedy kalibrovali optický kabel G.652.D, ale pouze s těsnou sekundární ochranou. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 4.3.

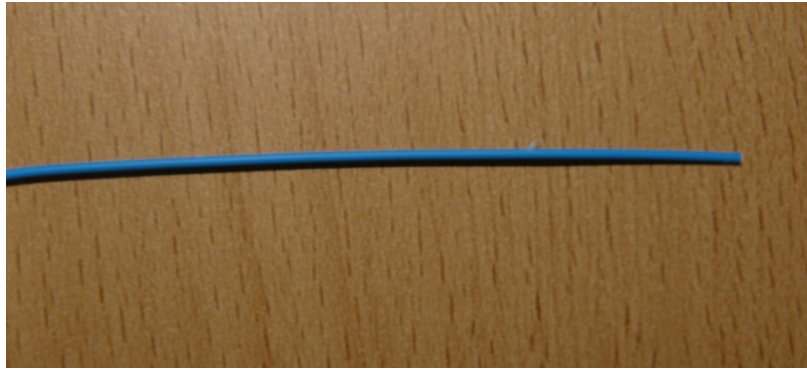
V levém sloupci tabulky 4.3. je opět zobrazena hodnota natažení optického vlákna G.652.D, tentokrát pouze těsnou sekundární ochranou. Optické vlákno s tímto typem ochrany již nebylo problém natáhnout (zdeformovat) o 4,5 mm, a také se při postupném prodlužování optického vlákna po 0,5 mm krocích lineárně zvedala síla, která na optické vlákno působila. Tyto hodnoty jsou zaznamenány ve druhém sloupci zleva v tabulce 4.3.

Vypočítané hodnoty microstrainu byly totožné jako u předchozích měření, protože délka deformovaného optického vlákna byla stejná, a také jsme vlákno natahovali po stejných 0,5mm krocích. Hodnoty byly vypočítány ze vzorce 4.2 Naměřené hodnoty microstrainu, se však oproti naměřeným hodnotám v tabulkách 4.1 a 4.2 liší. Tyto hodnoty (viz. tabulka 4.3) byly přibližně stejné jako vypočítané hodnoty microstrainu. Výsledky měření kalibrace jednovidového telekomunikačního vlákna G.652.D s těsnou sekundární ochranou tedy přibližně odpovídaly vypočítaným hodnotám microstrainu.

Tabulka 4.3: *Optický kabel G.652.D s těsnou sekundární ochranou*

Prodloužení vlákna [mm]	Síla tahu napínaného vlákna [N]	Výpočet microstrainu [$\mu\epsilon$]	Naměřený microstrain [$\mu\epsilon$]
0,0 (585,0 mm)	0,21		
0,5 (585,5 mm)	0,89	854,70	Zadaný do DSTS
1,0 (586,0 mm)	1,58	1709,40	1490,78
1,5 (586,5 mm)	2,31	2564,10	2524,74
2,0 (587,0 mm)	2,92	3418,80	3363,12
2,5 (587,5 mm)	3,62	4273,50	4153,32
3,0 (588,0 mm)	4,29	5128,21	4970,21
3,5 (588,5 mm)	4,94	5982,91	5750,14
4,0 (589,0mm)	5,54	6837,61	6669,11
4,5 (589,5 mm)	6,23	7692,31	7187,24

Tento typ vlákna s těsnou sekundární ochranou byl tedy vhodný pro měření vlivu uchycení optických vláken pomocí DSTS systému.



Obrázek 4.6: *Optický kabel G.652.D s těsnou sekundární ochranou*

Celá kalibrace optického kabelu byla prováděna při konstantní teplotě, která byla v laboratoři KP203 27 °C. Měření napětí (deformace) bylo teplotně závislé, pokud by měření probíhalo při odlišné teplotě, naměřené výsledky by se lišily.

DSTS systém také vypočítal Brillouinovu frekvenci (Offset), tato hodnota pro toto optické vlákno byla 10,8388919367065 GHz.

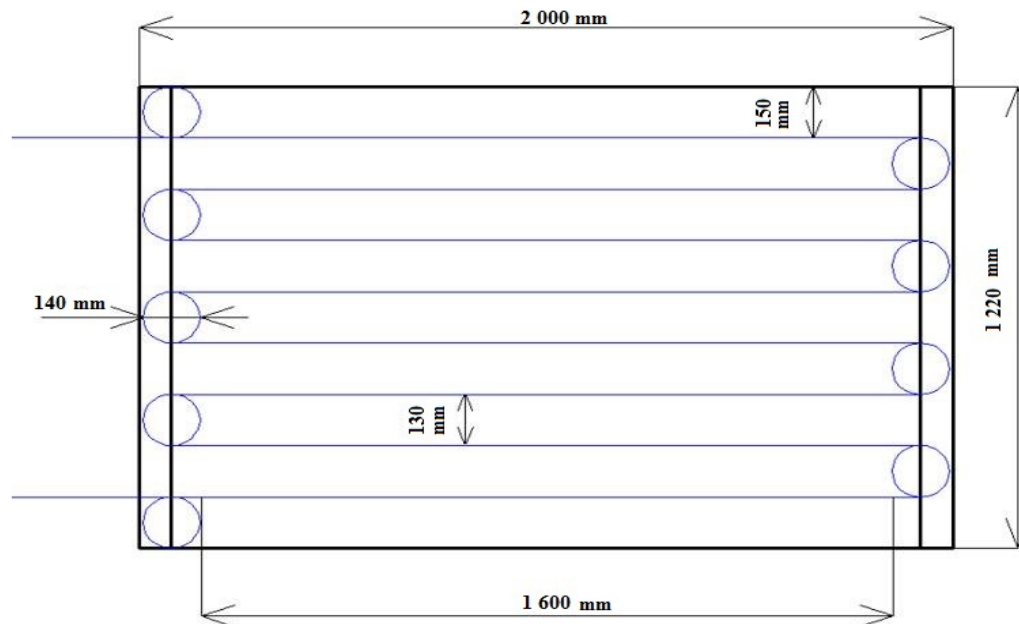
4.3 Návrh přípravku na měření a možnosti uchycení optického vlákna

Pro realizaci praktické části bakalářské práce bylo nutné vyrobit přípravek na měření, na kterém jsme simulovali deformaci optického vlákna. Cílem bylo vyrobit přípravek, na který bude možné uchytit optické vlákno různými způsoby tak, aby se nám při deformování tohoto přípravku deformovalo současně optické vlákno, které je po celé délce pevně přichyceno k tomuto přípravku. Návrh přípravku je graficky zobrazen na obrázku 4.7.

Jako materiál na přípravek na měření byla zvolena tenká sololitová deska o tloušťce 3 mm, délce 2000 mm a šířce 1220 mm. Tento druh materiálu byl námi zvolen z toho důvodu, že je snadno tvarovatelný, pružný, snadno ohybatelný a má nízkou hmotnost. Rozměry sololitové desky (2000 mm x 1220 mm) nám zajistily dostatečný prostor pro uchycení délky optického vlákna. Kraje sololitové desky byly zpevněny z obou stran čtyřmi deskami o rozměrech 1200 x 80 x 30 mm. Tyto desky byly na přípravek na měření připevněny tak, abychom zabránili deformaci okrajů přípravku. Na okrajích sololitové desky byly totiž umístěny smotky optických vláken, a pokud by došlo u těchto smotků k deformaci, výsledky našeho měření by mohly být touto příčinou zkreslené.

Na sololitovou desku o výše uvedených rozměrech bylo rozvrženo celkem osm drah, které měly od sebe odstup 130 mm. Délka každé dráhy měřila 1600 mm. Na každou tuto dráhu navazovala kružnice o průměru 140 mm. Kružnice zde zobrazovaly smotky optického vlákna. Každý tento smotek byl navržen proto, abychom oddělili od sebe jednotlivé dráhy, a to takovým způsobem, aby se navzájem neovlivňovaly různé způsoby uchycení optického vlákna.

Na desku bylo rozvrženo celkem osm drah, což odpovídalo osmi vybraným způsobům uchycení optického vlákna k sololitové desce. Lepicí páska Den Braven, voděodolná lepicí páska Pattex, montážní pěna Den Braven, akrylový tmel Den Braven, lepidlo Pattex 100%, lepidlo Chemopren, tavná pistole a dvousložková epoxidová pryskyřice Pattex. Každý z uvedených způsobů uchycení vykazoval rozdílné vlastnosti, rozdílné složení a rozdílnou strukturu tvrdosti. Kvůli rozdílné struktuře tvrdosti jednotlivých způsobů uchycení optického vlákna byly očekávány rozdíly v naměřených hodnotách deformace optického vlákna.

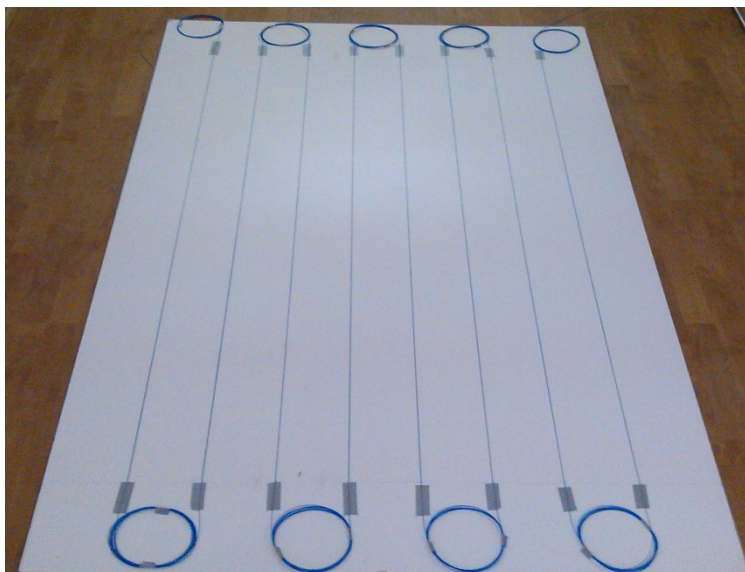


Obrázek 4.7: Návrh přípravku na měření

4.4 Realizace přípravku na měření

Realizace přípravku na měření probíhala v laboratoři KP203. Podle obrázku 4.2 jsme dle uvedených kót přenesli nákres na sololitovou desku. Poté jsme vypočítali délku optického vlákna, které bylo připevněno na narýsované kružnice a dráhy na sololitové desce.

Každá kružnice byla zhotovena z deseti závitů o průměru 140 mm, na návrhu bylo těchto kružnic devět. Bylo vypočítáno, že na deset závitů o průměru 140 mm bude potřeba 4398 mm optického vlákna. Těchto kruhů se na desce nacházelo celkem devět, takže na tyto kruhy bylo potřeba celkem 39582 mm optického vlákna. Na desce se nacházelo také osm drah o délce 1600 mm, tudíž na tyto dráhy bylo potřeba 12800 mm optického vlákna. Celková délka optického vlákna připevňovaná k přípravku na měření činila 52382 mm, což bylo 52,4 m. Jako optické vlákno bylo použito telekomunikační vlákno G.652.D. Z tohoto vlákna bylo nutné odstranit PVC obal a aramidové opletení, a to proto, že vlákno s tímto typem ochrany jsme vyloučili již při kalibraci. Důvody tohoto kroku jsou uvedeny v kapitole 4.2. Optické vlákno G.652.D s těsnou sekundární ochranou je zobrazeno na obrázku 4.6. Připevňené optické vlákno pomocí lepicí pásky je zobrazeno na obrázku 4.8.



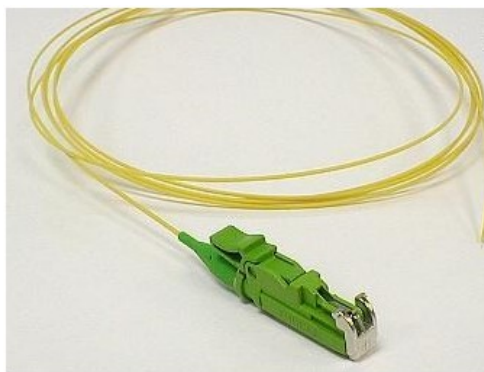
Obrázek 4.8: *Fotografie přípravku na měření před aplikací jednotlivých uchycení*

Optické vlákno bylo postupně připevněno k sololitové desce pomocí lepicí pásky Den Braven, přičemž jsme se snažili o to, aby jednotlivé dráhy optického vlákna byly zhruba stejně napnuté, jinak řečeno, chtěli jsme zabránit napnutí drah různou silou. Tímto postupem jsme chtěli docílit toho, aby byly viditelné rozdíly při deformaci jednotlivých uchycení.

Ke dvěma koncům optického vlákna jsme pomocí kompaktní svářecí stanice Sumitomo T-71C, která je zobrazena na obrázku 4.9, kvůli spojení s DSTS přivařili pigtaily E2000/APC SM 9 /125 G.652.D.

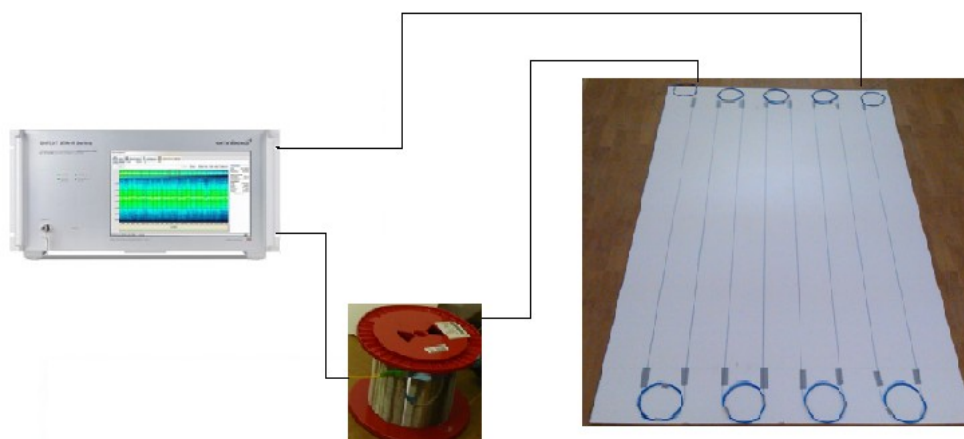


Obrázek 4.9: *Kompaktní svářecí stanice Sumitomo T-71C*



Obrázek 4.10: *Pigtail E2000/APC SM 9 /125 G652.D.*

Poté byl přípravek na měření, který je zobrazen na obrázku 4.8, propojen z jedné strany DSTS přístrojem a z opačné strany cívkou předřadného vlákna. Druhý konec této cívky byl taktéž spojen se vstupem do DSTS systému. Schematické zobrazení kalibrace přípravku na měření je zobrazeno na obrázku 4.11.



Obrázek 4.11: *Schematické zobrazení kalibrace přípravku na měření*

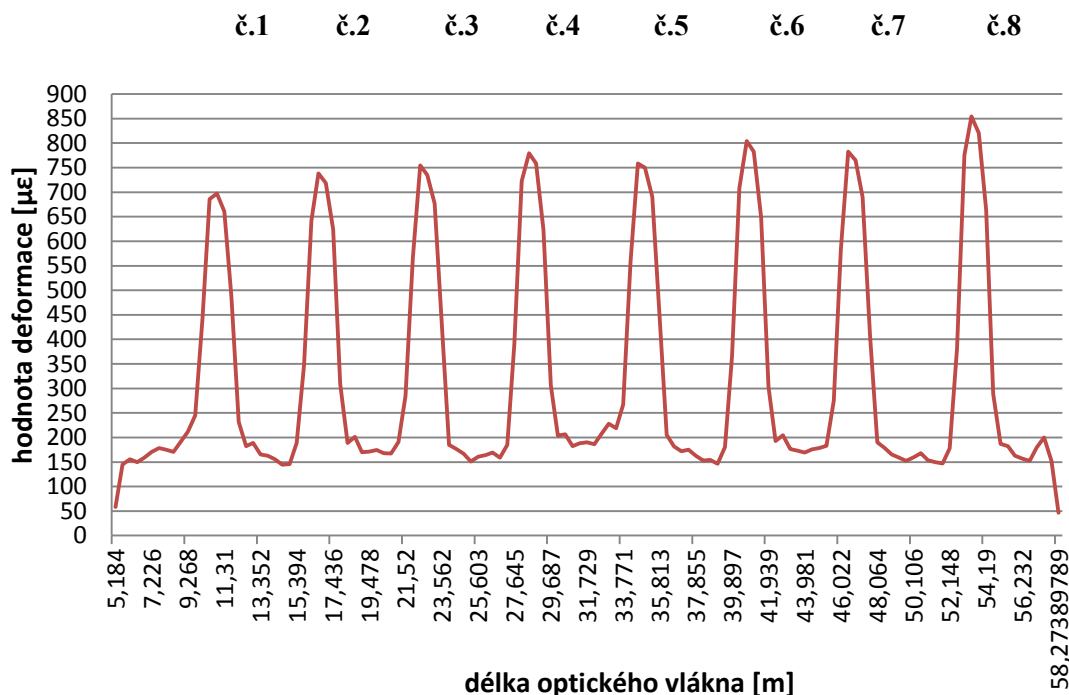
Tato kalibrace byla provedena z důvodu rovnoměrného natažení osmi drah. Naším cílem bylo natáhnout všechny tyto dráhy stejnou silou, a to proto, aby po aplikaci jednotlivých uchycení, a následné deformaci přípravku na měření, byl rozpoznatelný případný naměřený rozdíl deformací mezi jednotlivými uchyceními.

Pro přesnou kalibraci přípravku na měření bylo nutné do DSTS systému DITEST STA-R™ (obrázek 4.1) zadat hodnotu Brillouinové frekvence (hodnotu Offset), kterou nám tento systém změřil při kalibraci optického vlákna. Tato hodnota byla 10,8388919367065 GHz.

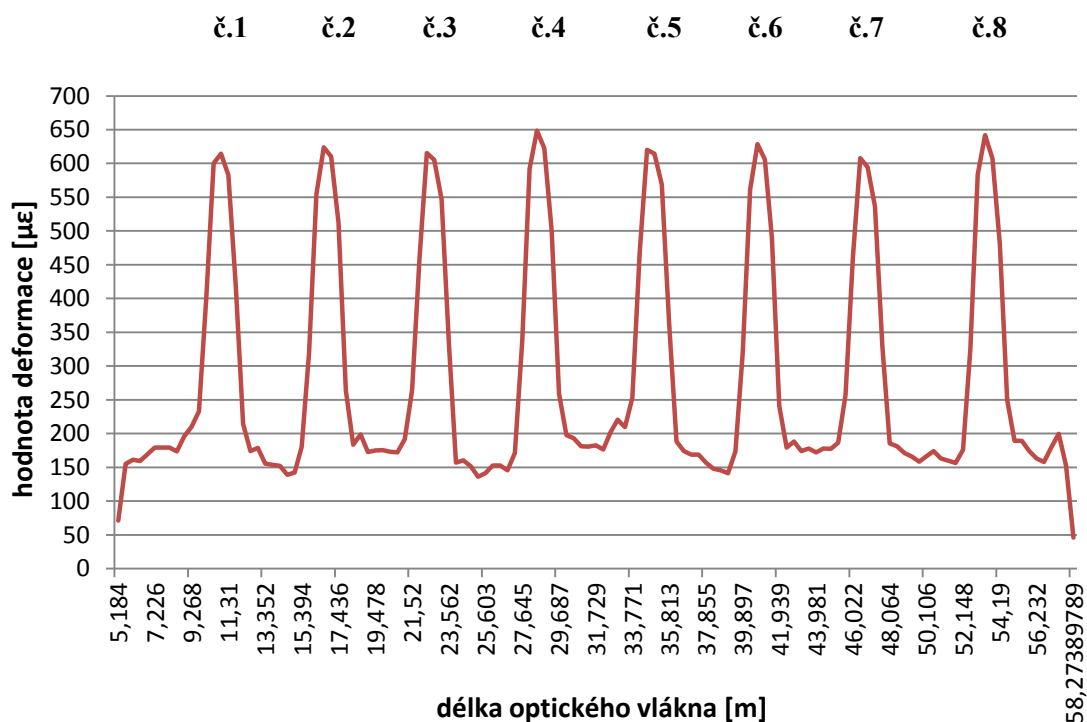
Na obrázku 4.12 je zobrazen graf, který je vykreslen z prvního měření při kalibraci přípravku na měření. Na vodorovné ose je zaznamenána délka měřeného optického vlákna, které je připevněno k sololitové desce. Na svislé ose je vynesena hodnota deformace optického vlákna v microstrainech [$\mu\epsilon$]. Na grafu je zobrazeno všech osm drah a je z něj patrné, že každá dráha je různě napnutá. Například první dráha vlevo (č.1) měla hodnotu natažení 700 $\mu\epsilon$, kdežto poslední dráha napravo (č.8) měla hodnotu natažení přes 850 $\mu\epsilon$. Tomuto rozdílu jsme se při kalibraci přípravku na měření chtěli vyhnout a potřebovali jsme dosáhnout, co největší shody.

Z výše uvedeného důvodu jsme každou dráhu, podle výsledků prvního měření kalibrace přípravku, opakovaně připevňovali k sololitové desce a opět jsme se snažili o stejné natažení těchto drah. Měření jsme poté opakovali podle zapojení blokového schématu, které je na obrázku 4.11.

Graf znázorňující nekalibrovaný přípravek na měření je znázorněn na obrázku 4.13. Na tomto grafu už se hodnoty microstrainu jednotlivých drah od sebe nijak podstatně nelišily. Největší rozdíl v hodnotě microstrainu byl shledán mezi dráhou č. 7 (608 $\mu\epsilon$) a dráhou č.4 (649 $\mu\epsilon$). Tyto rozdíly však byly zanedbatelné.

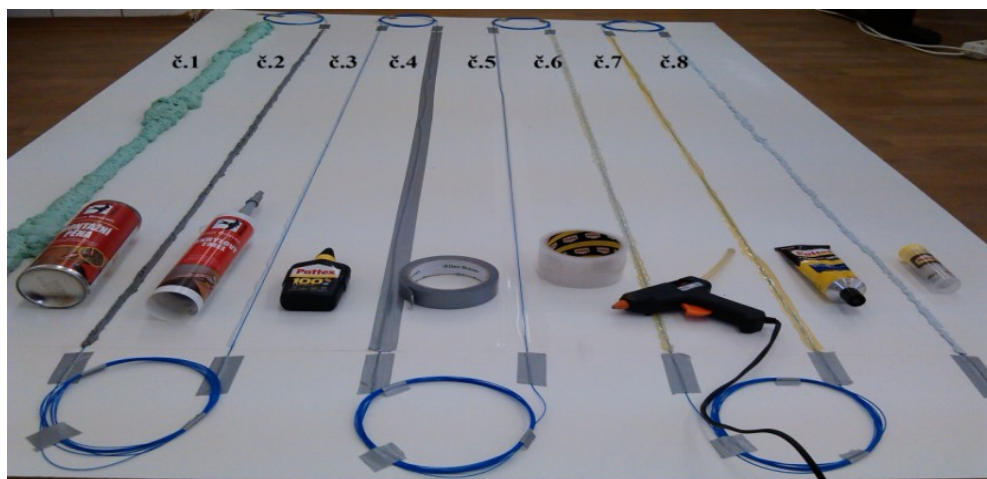


Obrázek 4.12: Graf znázorňující původní naměřenou deformaci jednotlivých osmi drah při kalibraci přípravku na měření



Obrázek 4.13: Graf znázorňující na kalibrovaný přípravek na měření

Poté, co byla provedena kalibrace přípravku na měření, tak byly na tuto desku aplikovány jednotlivé způsoby uchycení. Před použitím těchto uchycení byla sololitová deska zbavena nečistot, a také odmaštěna, aby jednotlivé způsoby uchycení na sololitovou desku a optické vlákno dobře přilnuly. Na obrázku 4.14 je fotografie přípravku na měření těsně po aplikaci jednotlivých způsobu uchycení. Po této aplikaci jsme s deskou 48 hodin nemanipulovali, aby použitá lepidla a tmely dobře zaschly.



Obrázek 4.14: Fotografie přípravku na měření po aplikaci jednotlivých způsobů uchycení optického vlákna

Tabulka 4.4: *Seznam použitých uchycení optického vlákna*

č.1	č.2	č.3	č.4	č.5	č.6	č.7	č.8
Montážní pěna	Akrylový tmel	Lepidlo pattex	Lepicí páska	Lep.p voděod.	Tavná pistole	Chemo-pren	Epoxidová pryskyřice

Poté byly na přípravek na měření přichyceny desky, které měly zabránit deformaci smotkům optického vlákna. Výsledný přípravek na měření je zobrazen na obrázku 4.15

Obrázek 4.15: *Výsledný přípravek na měření*

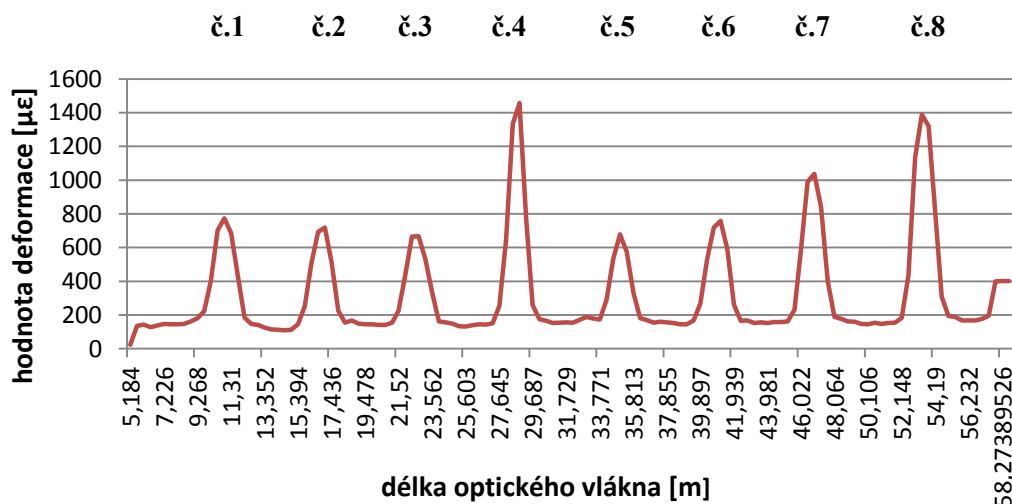
5 Měření vlivu uchycení optických vláken

Měření probíhalo podle schématu zapojení 4.11, protože toto měření je principiálně stejné, pouze s tím rozdílem, že optické vlákno bylo k přípravku na měření připevněno pomocí různých způsobů uchycení.

Pro přesné měření vlivu uchycení optických vláken bylo nutné zadat do DSTS systému DITEST STA-R™ (obrázek 4.1) hodnotu Brillouinovské frekvence (hodnotu Offset). Tato hodnota frekvence byla změřena již v kapitole 4.2 při kalibraci optického vlákna (10,8388919367065 GHz.). Měření probíhalo opět v laboratoři KP203 při stejné okolní teplotě (27 °C), která byla naměřena i při kalibraci optického vlákna.

Měření vlivu uchycení optických vláken probíhalo následovně. Deformace optického vlákna byla změřena nejprve při narovnaném přípravku na měření, tedy v poloze, kdy tento přípravek nebyl nijak deformován. Poté byl přípravek na měření deformován tak, že sololitová deska byla postupně ohýbána po deseti centimetrových krocích, až po takový ohyb, kdy jednotlivé konce této desky byly od sebe vzdáleny 30 centimetrů. Díky tomu, že na desce bylo přichyceno optické vlákno pomocí osmi různých způsobů uchycení, jsme byli schopni pomocí DSTS přístroje DITEST STA-R™ změřit rozdíly mezi jednotlivými způsoby uchycení tohoto optického vlákna.

Na obrázku 5.1 je zobrazen graf po prvním měření vlivu uchycení optických vláken. Měření probíhalo na narovnaném přípravku na měření. Tyto hodnoty měly být podobné jako hodnoty při kalibraci přípravku na měření (obrázek 4.13). Hodnoty na grafu 5.1, se však podstatně liší. Tento rozdíl byl způsoben aplikací jednotlivých uchycení optických vláken. Jak můžeme vidět na grafu 5.1, tak podle naměřených hodnot, je nejvíce zdeformované uchycení optického vlákna č.4, č.8, a také uchycení č.7. Z grafu 5.1 vyplývá, že jsme byli nuceni přepočítat všechny naměřené hodnoty tak, aby byl vidět případný výsledný rozdíl mezi jednotlivými způsoby uchycení optického vlákna.



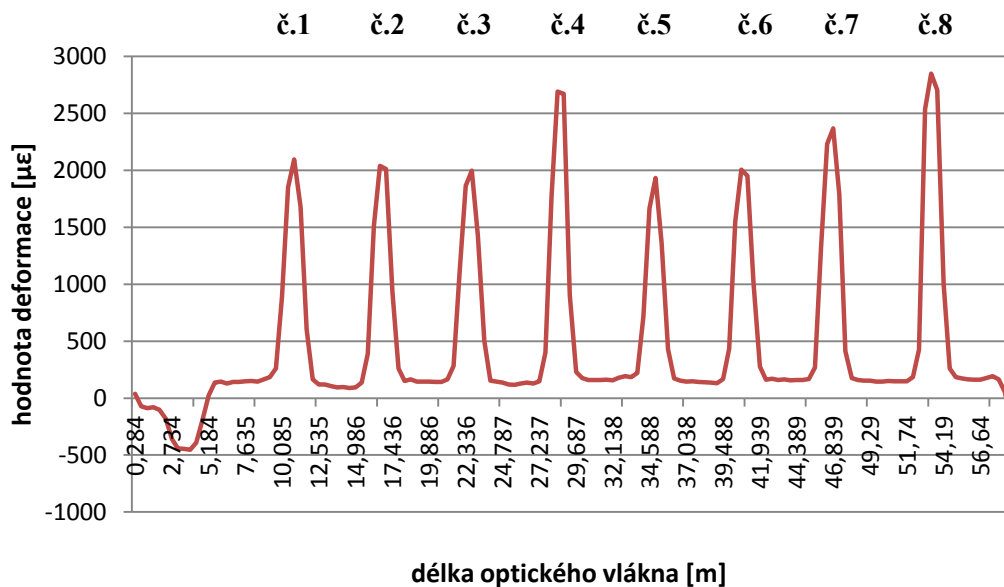
Obrázek 5.1: Graf naměřených hodnot při nezdeformovaném přípravku na měření

Tabulka 5.1: Hodnoty microstrainu při nezdeformovaném přípravku na měření

Uchycení	č.1	č.2	č.3	č.4	č.5	č.6	č.7	č.8
microstrain [$\mu\epsilon$]	774	718	668	1458	679	759	1038	1389

Naměřené hodnoty byly přepočítány takovým způsobem, aby se srovnaly do stejné počáteční pozice, a to z toho důvodu, abychom lépe viděli případné rozdíly deformace v daném uchycení. Přepočet byl proveden následovně. Od naměřených hodnot jednotlivých deformací byla odečtena počáteční hodnota microstrainu před deformací. Odečtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Jako příklad uvedeme přepočítání grafu, který je zobrazen na obrázku 5.2. Tento graf je vykreslen z hodnot, kdy deformace přípravku na měření byla 150 cm.



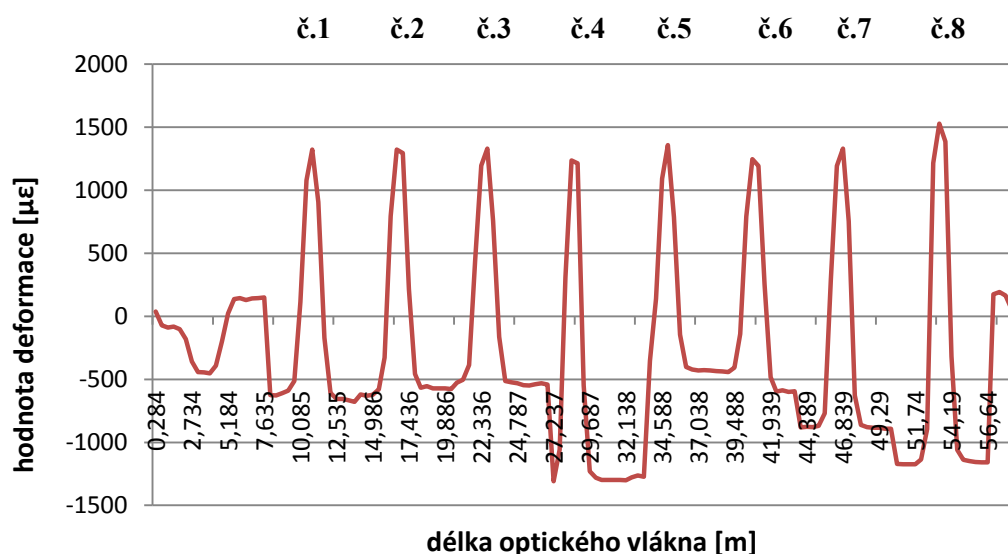
Obrázek 5.2: Graf z naměřených hodnot při deformaci na 150cm

Tabulka 5.2: Hodnoty microstrainu při deformaci na 150 cm.

Uchycení	č.1	č.2	č.3	č.4	č.5	č.6	č.7	č.8
microstrain [$\mu\epsilon$]	2097	2039	1997	2693	1931	2005	2369	2849

Hodnoty deformace (microstrainu), které byly naměřeny při prvním měření, a z nichž je vykreslen graf 5.1, byly odečteny od všech ostatních hodnot tohoto měření. V případě grafu 5.2 byla od hodnoty 2097 $\mu\epsilon$ odečtena hodnota deformace 774 $\mu\epsilon$ (tabulka 5.1). Tímto způsobem

byly přepočítány všechny naměřené hodnoty a z těchto přepočítaných hodnot vykresleny grafy. Graf přepočítaných hodnot deformace přípravku na 150 je zobrazen na obrázku 5.3



Obrázek 5.3: Graf přepočítaných hodnot při deformaci 150 cm

Na Grafu 5.3 jsou vidět skutečné rozdíly mezi jednotlivými způsoby uchycení optického vlákna při deformaci, kdy byl přípravek na měření zdeformován tak, že byly konce drah optického vlákna od sebe vzdáleny 150 cm.

V tabulce 5.3 jsou uvedeny přepočítané hodnoty deformace pro všechny měřené ohyby. Na těchto hodnotách je vidět skutečný rozdíl vlivu uchycení optického vlákna.

Tabulka 5.3: Rozdíly hodnot deformací při všech měřených ohybech

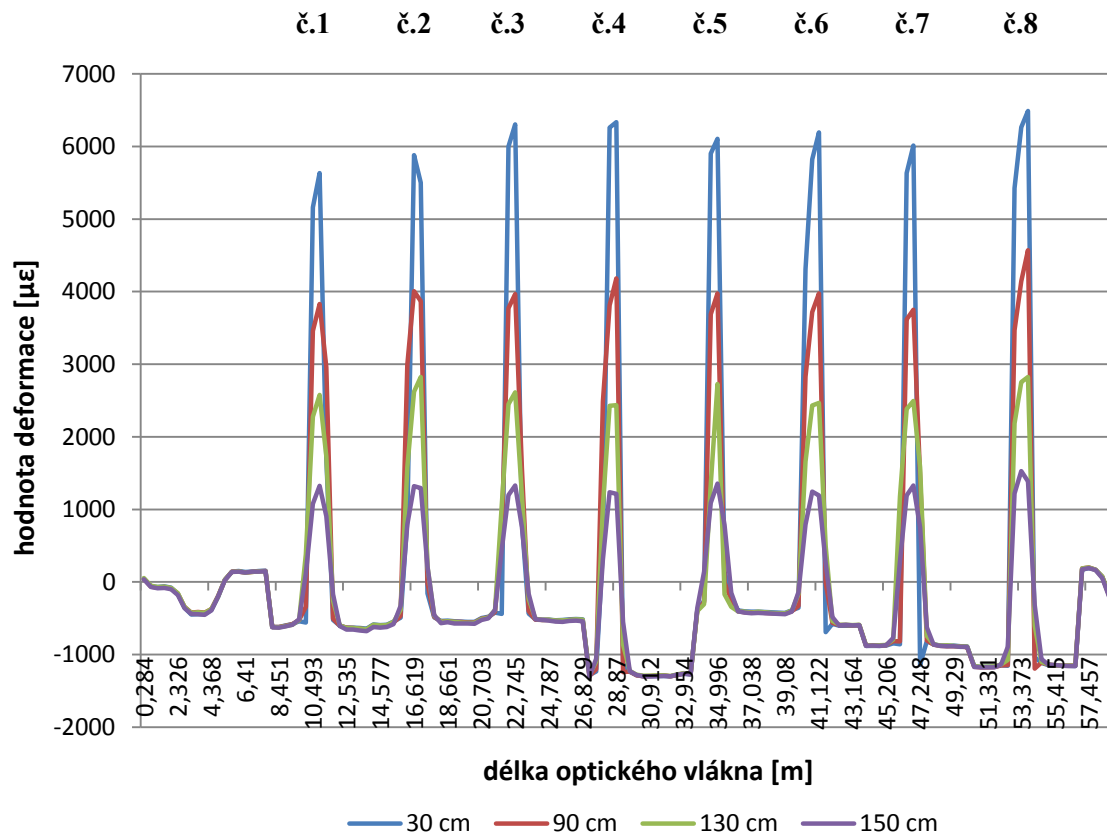
Ohyb [cm]	Montážní pěna	Akrylový tmel	Lepidlo pattex	Lepicí páska	Lep.p voděod.	Tavná pistole	Chemo pren	Epoxidová pryskyřice
	č.1 [με]	č.2 [με]	č.3 [με]	č.4 [με]	č.5 [με]	č.6 [με]	č.7 [με]	č.8 [με]
30	5636,3	5880,8	6303,2	6334,6	6105,0	6193,2	6014,9	6491,3
60	4600,7	4815,3	5066,9	5009,3	4988,5	5466,2	4774,2	5375,0
70	4354,1	4588,5	4653,6	5018,1	4681,1	4778,2	4466,2	5093,0
80	4009,2	4181,1	4217,9	4353,9	4279,2	4296,6	4102,0	4713,0
90	3828,8	4005,5	3966,9	4182,4	3975,4	3977,1	3750,5	4569,4
100	3376,4	3617,3	3468,4	3352,2	3337,1	3224,4	3229,5	3645,1
110	3355,0	3471,6	3425,2	3279,5	3387,2	3256,9	3225,7	3760,6

Ohyb [cm]	Montážní pěna	Akrylový tmel	Lepidlo pattex	Lepicí páska	Lep.p voděod.	Tavná pistole	Chemo pren	Epoxidová pryskyřice
	č.1 [με]	č.2[με]	č.3[με]	č.4[με]	č.5[με]	č.6[με]	č.7[με]	č.8[με]
120	3015,2	3079,6	3061,9	2924,6	3218,1	2930,3	2913,3	3357,7
130	2578,9	2621,1	2614,7	2434,6	2728,4	2467,4	2492,1	2823,8
140	2317,0	2315,9	2305,4	1213,6	2029,6	2137,8	2160,0	1385,6
150	1323,0	1295,1	1329,2	1235,4	1257,7	1193,1	1331,1	1528,2

Hodnoty v tabulce 5.3, které jsou uvedeny v microstrainech, bylo možné přepočítat pomocí trojčlenky na hodnoty v mm. Tento přepočítání bylo možné zrealizovat díky tomu, že byla již dříve provedena kalibrace optického vlákna (viz. tabulka 4.3). Vycházeli jsme z hodnoty naměřeného microstrainu, přičemž délka kalibrovaného vlákna před deformací byla 585 mm a po jeho natažení o 1 mm byla naměřena hodnota deformace 1490,78 με. Pokud byla délka daného způsobu uchycení optického vlákna 1600 mm, tak při natažení její délky o 1 mm byla hodnota deformace rovna 546,1 με .

Tabulka 5.4: *Hodnoty deformace přepočítané z microstrainů na mm*

Ohyb [cm]	Montážní pěna	Akrylový tmel	Lepidlo pattex	Lepicí páska	Lep.p voděod.	Tavná pistole	Chemo pren	Epoxidová pryskyřice
	č.1[mm]	č.2[mm]	č.3[mm]	č.4[mm]	č.5[mm]	č.6[mm]	č.7[mm]	č.8[mm]
30	10,3	10,8	11,5	11,6	11,2	11,3	11,0	11,9
60	8,4	8,8	9,3	9,2	9,1	10,0	8,7	9,8
70	8,0	8,4	8,5	9,2	8,6	8,7	8,2	9,3
80	7,3	7,7	7,7	8,0	7,8	7,9	7,5	8,6
90	7,0	7,3	7,3	7,66	7,3	7,3	6,9	8,4
100	6,2	6,6	6,4	6,1	6,1	6,0	5,9	6,8
110	6,1	6,4	6,3	6,0	6,2	6,0	5,9	6,9
120	5,5	5,6	5,6	5,4	5,9	5,4	5,3	6,1
130	4,7	4,8	4,8	4,5	5,0	4,5	4,6	5,2
140	4,3	2,4	4,2	4,4	3,7	3,9	4,0	4,4
150	2,4	2,4	2,4	2,3	2,3	2,2	2,4	2,7



Obrázek 5.4: Graf přepočítaných hodnot deformací 150, 130, 90, 30 cm

Na grafu 5.4 jsou vykresleny rozdílné hodnoty deformací (150, 130, 90 a 30 cm). Z grafu je patrný rozdíl mezi všemi způsoby uchycení. Rozdíly v naměřených hodnotách byly způsobeny rozdílnými vlastnostmi jednotlivých způsobů uchycení po vytvrzení. Největší rozdíl byl shledán mezi uchycením č.1 a uchycením č.8. Optické vlákno bylo u uchycení č.1 připevněno k přípravku na měření pomocí montážní pěny Den Braven, která byla rozpínavá (pružná) a měla zcela odlišnou strukturu po vytvrzení než optické vlákno přichycené pomocí uchycení č.8. Uchycení optického vlákna č.8 bylo realizováno dvousložkovou epoxidovou pryskyřicí Pattex. Tato pryskyřice byla po vytvrzení tvrdá jako kámen a bylo možné ji brousit, vrtat či jinak mechanicky opracovávat. Při deformaci optického vlákna kladla dvousložková epoxidová pryskyřice Pattex (uchycení č. 8) největší odpor deformovanému optickému vláknu a právě z tohoto důvodu byla hodnota deformace tohoto uchycení nejvyšší. Naopak montážní pěna Den Braven (uchycení č. 1) kladla deformovanému optickému vláknu odpor nejmenší, a to kvůli vlastnostem, které již byly zmíněny.

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval optoelektronikou v senzorce, konkrétně tomu, jaký vliv mají různé způsoby uchycení optického vlákna na jeho deformaci. Deformace optického vlákna byla měřena na optovláknovém distribuovaném systému DITEST STA-R™, což je systém pracující na stimulovaném Brillouinově rozptylu. Tento systém dokáže distribuovaně změřit jak teplotu, tak deformaci optického vlákna.

Při kalibraci optického vlákna (kapitola 4.2) bylo zjištěno, že optické vlákno se sekundární ochranou, jehož součástí je aramidové opletení a PVC obal není vhodné pro měření vlivu uchycení optického vlákna. Aramidové opletení neumožňuje dostatečnou deformaci a PVC obal při kalibraci zkresluje naměřené hodnoty distribuovaného systému DITEST STA-R™. Díky tomuto zjištění bylo zvoleno optické vlákno pouze s těsnou sekundární ochranou, které toto aramidové opletení neobsahovalo.

Jedním z cílů této práce bylo zjistit, zda je distribuovaný systém DITEST STA-R™ schopen změřit deformaci optického vlákna s těsnou sekundární ochranou při různých způsobech uchycení. Deformace byla měřena na vyrobeném přípravku na měření, na který bylo připevněno optické vlákno pomocí osmi různých uchycení (obrázek 4.15). Z naměřených výsledků (tabulka 5.3) jsou mezi osmi jednotlivými způsoby uchycení patrné rozdíly v deformaci optického vlákna. Největší naměřené rozdíly byly mezi uchyceními s rozdílnou strukturou pružnosti materiálu. Nejmenší deformace optického vlákna byla naměřena v místě, kde bylo optické vlákno připevněno pomocí montážní pěny, tato pěna byla ze všech použitých uchycení nejvíce pružná (rozpínavá). Kdežto dvousložková epoxidová pryskyřice byla po vytvrdnutí velmi tvrdá a odpor při deformaci optického vlákna byl největší. Tedy největší rozdíl ve struktuře, který byl shledán právě u těchto dvou způsobů uchycení, způsobil také největší rozdíly v deformaci optického vlákna. Z naměřených výsledků je tedy patrné, že různé způsoby uchycení u optických vláken mají skutečně vliv na jejich deformaci.

Domnívám se, že v budoucnu by bylo dobré, se více zaměřit na odlišné řešení přípravku na měření, za předpokladu použití jiného materiálu. Jedno z možných řešení by mohlo vypadat tak, že bychom vyfrézovali dráhy, a do těchto drah by byly aplikovány různé druhy lepidel. Do čerstvě aplikovaných lepidel by bylo vloženo optické vlákno, které by bylo připevněno i shora, a to opět stejným typem uchycení. Optické vlákno by tedy bylo obaleno daným materiálem po celém jeho profilu, čímž bychom se více přiblížili možnostem praktického využití.

Použitá literatura

- [1] JAKUBEC, Stanislav. *Modelovanie prechodu svetla prostredím v objemovej reprezentácii pomocou GPU* [online]. 2013. [vid. 2014-03-10] Dostupné z: http://ics.upjs.sk/~krajci/skola/ine/SVK/pdf/_Jakubec.pdf
- [2] DADO, Milan, I. TUREK, J. ŠTELINA, L. BITTERER, S. TUREK, E. GROLMUS a P. STIBOR. *Kapitoly z optiky: pre technikov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 1998, 348 s. ISBN 80-7100-390-5.
- [3] HULST van de, Hendrik Christoffel. *Light scattering by small particles*. New York: Dover, 1981, 470 s. ISBN 0-486-64228-3.
- [4] KLOUDA, Pavel. *Moderní analytické metody*. Ostrava: nakladatelství Pavel Klouda, 2003, 130 s. ISBN 80-86-36-9-07-2
- [5] LONG, Derek A. *The Raman Effect: A Unifield Treatment of the Theory od Raman Scattering by Molecules*. 1. vyd. England: John Willey & Sons, 2002, 598 s. ISBN 978-0-471-49028-9.
- [6] KUCHARSKI, Maciej a Pavel DUBSKÝ. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. Praha: MIKROKOM, 1998, 141 s. ISBN 8023828444.
- [7] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. 2006. [vid. 2014-02-23] Dostupné z: <http://www.goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [8] MAŇÁK, Roman. Rayleighův a Mieův rozptyl I. *Inflow: Parhelium* [online]. 2007, č. 3. [vid. 2014-02-28]. Dostupné z: <http://ukazy.astro.cz/gal/Parhelium200703.pdf>
- [9] ŠIŠKA, Petr a František HANÁČEK. *Nekomunikační Aplikace Optických Vláken* [online]. [vid.2014-02-12]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/122955997/Nekomunika%C4%8Dni-aplikace-optick%C3%BDch-vlaken>
- [10] OMNISENS SA. *User Manual DITEST STA-RTM*. [s.l.]: Omnisens SA, ©2013.
- [11] SINGH, Sunil Pratap, R. GANGWAR a N. SINGH. Nonlinear scattering effects in optical fibers. *Inflow: Progress In Electromagnetics Research* [online]. 2007, roč. 74, 379-405 s. [vid. 2014-04-01]. ISSN 1559-8985. Dostupné z: <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=07051102>
- [12] BOYD, Robert W. *Nonlinear optics*. Boston: Academic Press, 2008, 613 s. ISBN 9780123694706.
- [13] AGRAWAL, Govind P. *Nonlinear fiber optics*. San Diego: Academic Press, 1989, 335 s. ISBN 0-12-045140-09.

- [14] KOUDELKA, Petr, J. Látal, J. Vitasek, J. Hurta, P. Šiška, A. Liner a M. Papes. Implementation of optical meanders of the optical-fiber DTS systém based on Raman stimulated scattering into the building process. *Inflow: Optics and Optoelectronics* [online]. 2012, roč. 10, č. 3, 187-194 s. [vid. 2014-04-9]. ISSN 1804-3119. Dostupné z: <http://advances.utc.sk/index.php/AEEE/article/view/643>
- [15] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektorniky: 3. díl Optoelektronika*. Praha: BEN, 2005, 160 s. ISBN 80-7300-184-5.
- [16] FAJKUS, Marcel. Měření deformace optického vlákna – microstrain. In: *OPTE. IMATTE.CZ* [online]. Jul 30, 2013, 7:16 am[vid. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://opte.imatte.cz/experiment/84-mereni-deformace-optickeho-vlakna-microstrain>
- [17] FAJKUS, Marcel. Realizace přípravku na upevnění optického vlákna (2). In: *OPTE.IMATTE.CZ* [online]. Jul 29, 2013, 6 pm[vid. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://opte.imatte.cz/experiment/83-realizace-pipravku-na-upevnni-optickeho-vlakna-2>

Seznam příloh

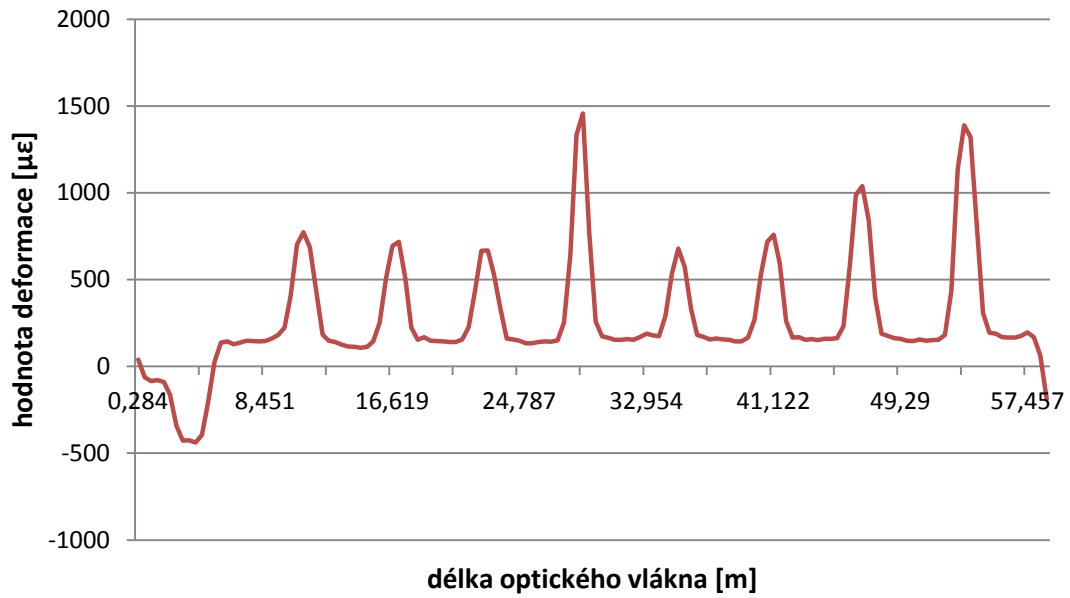
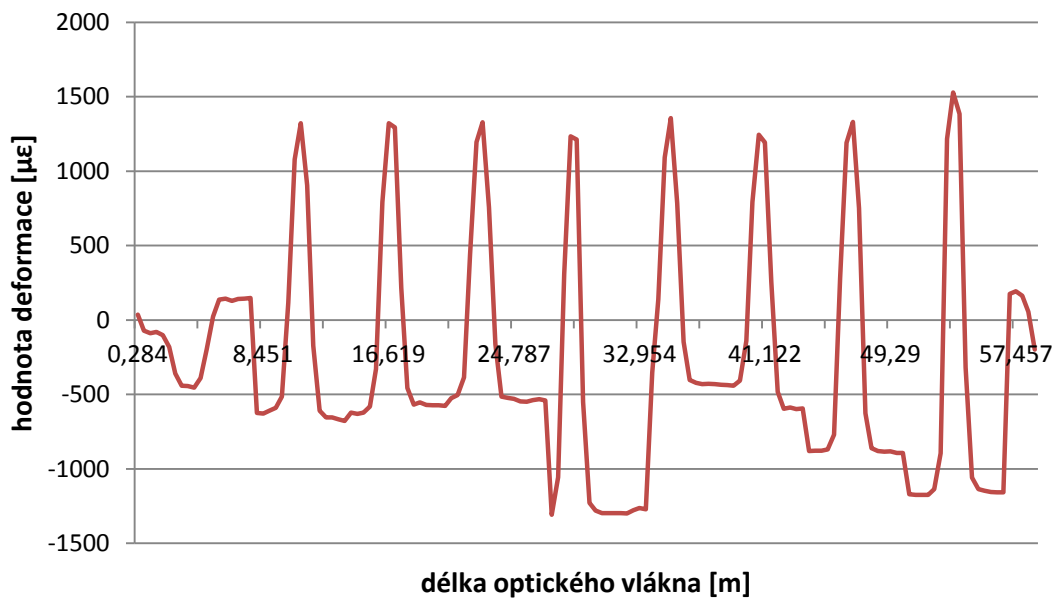
Příloha A:	Grafy zobrazující jednotlivé deformace	I
Příloha B:	Graf zobrazující všechny deformace	VII

Součástí BP je CD,

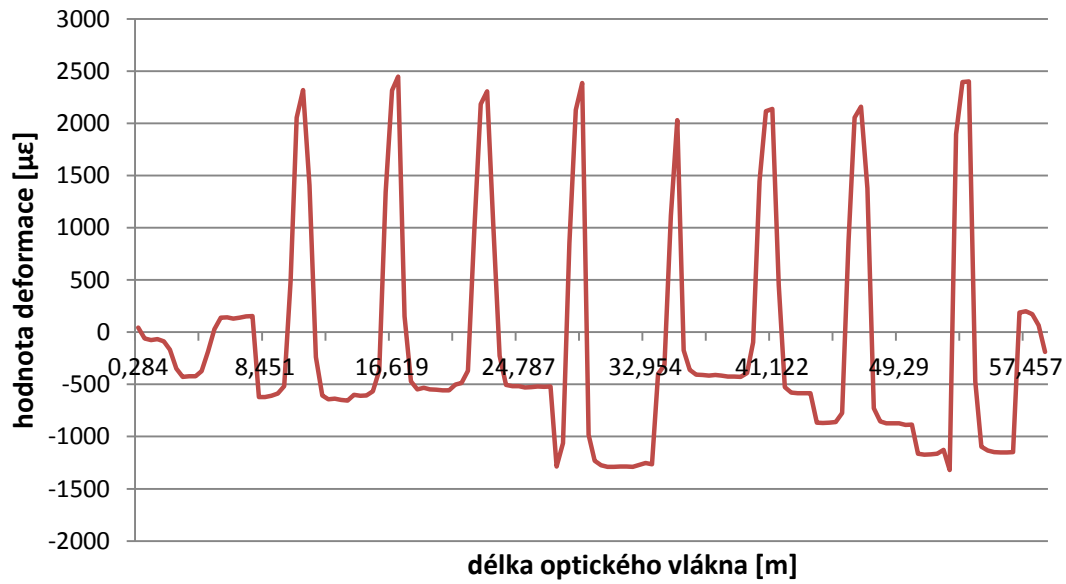
Adresářová struktura přiloženého CD:

/manual-DSTS	* manuál k měřicímu přístroji
/naměřené hodnoty	* naměřené hodnoty
/zpracované hodnoty deformace	* zpracované hodnoty deformace
/DITEST_Data_Viewer_SETUP_V1.1.1.0	* DITEST Data Viewer

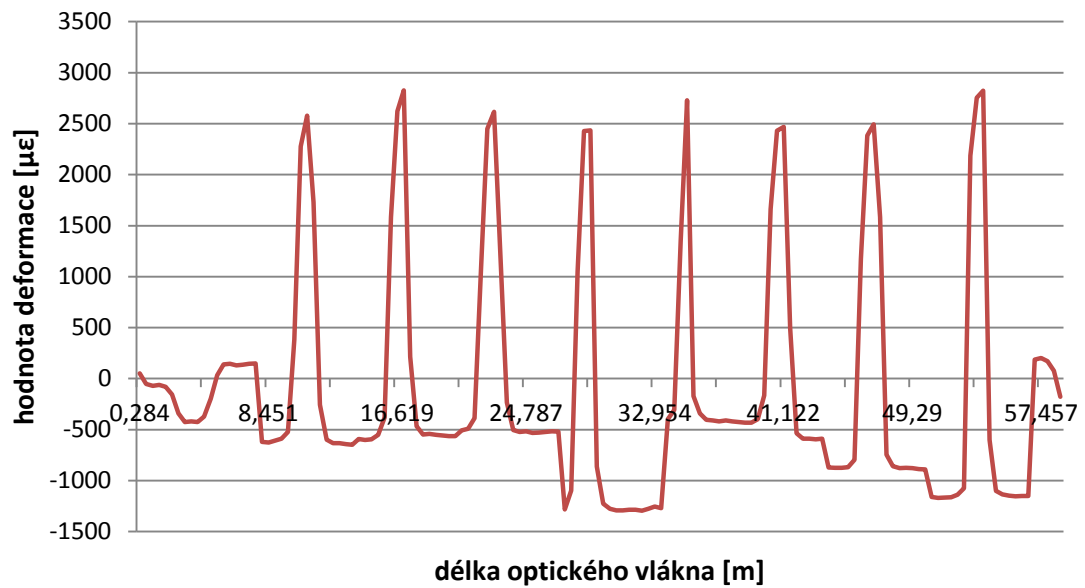
Příloha A: Grafy zobrazující jednotlivé deformace

Nezdeformovaný přípravek (nepřepočítaný)*Deformace přípravku na 150 cm*

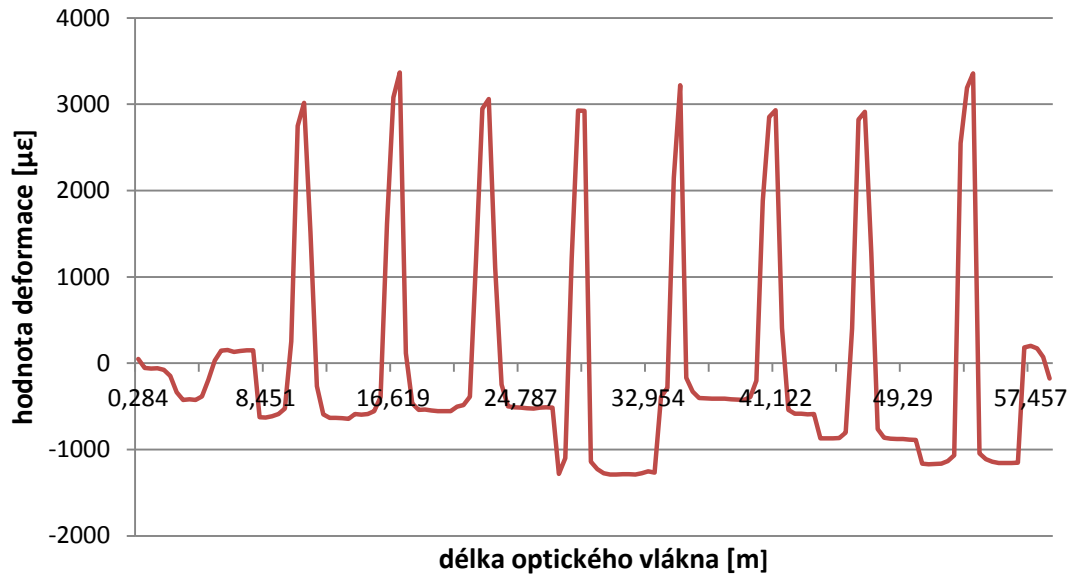
Deformace přípravku na 140 cm



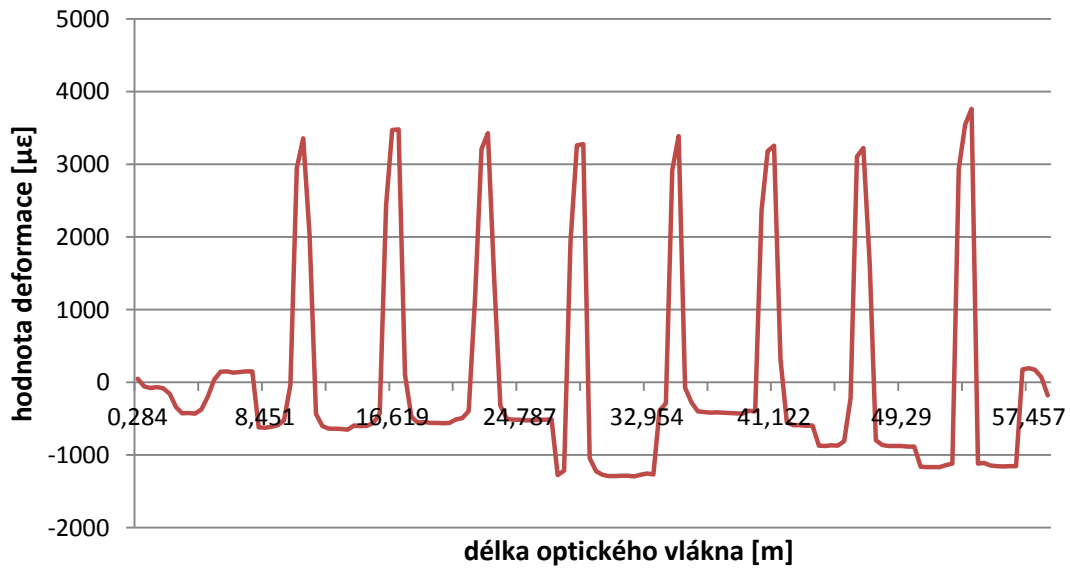
Deformace přípravku na 130 cm



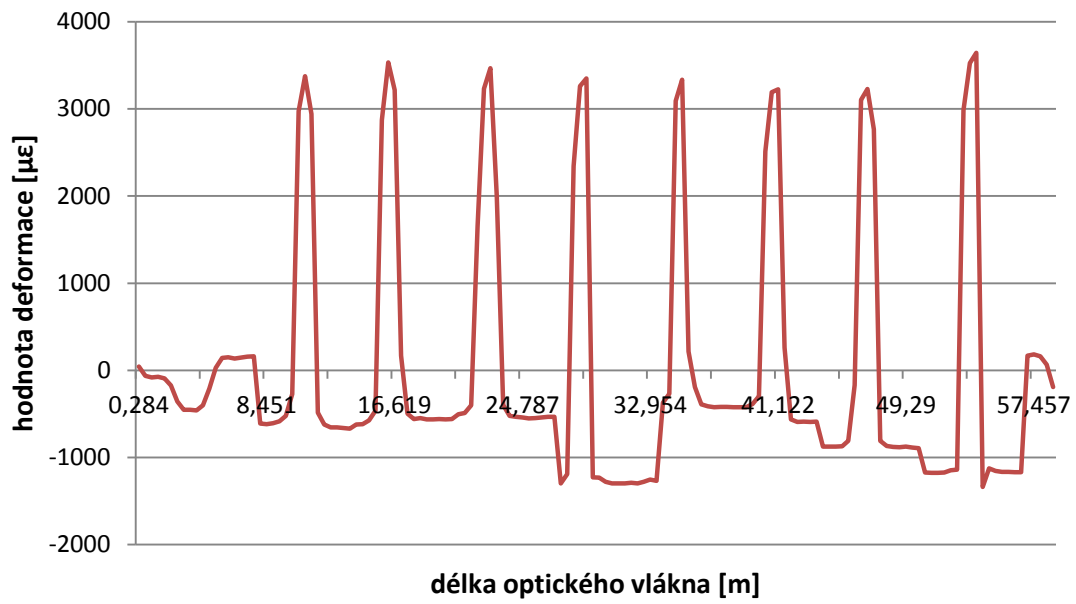
Deformace přípravku na 120 cm



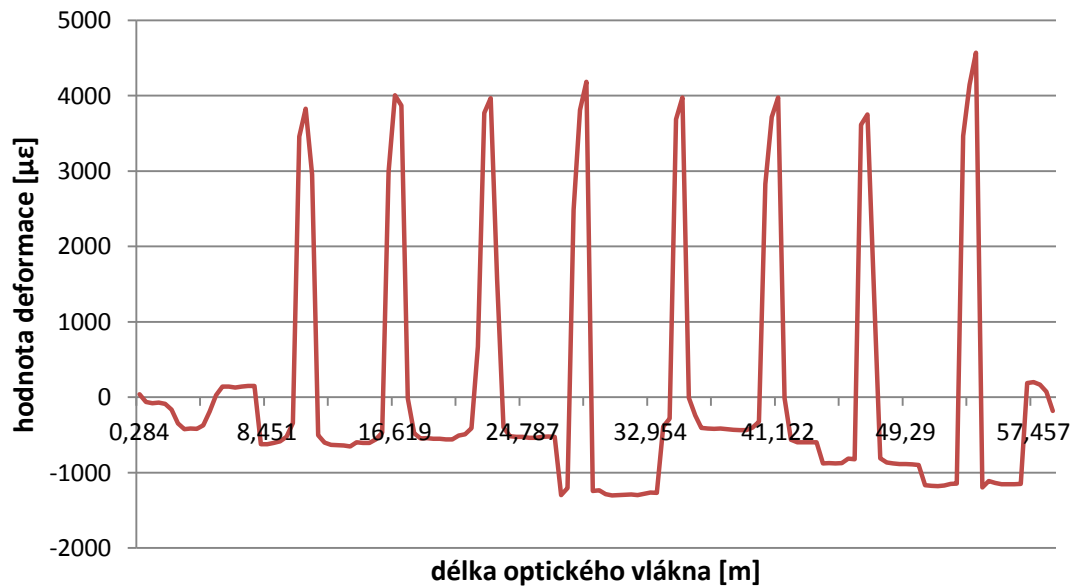
Deformace přípravku na 110 cm



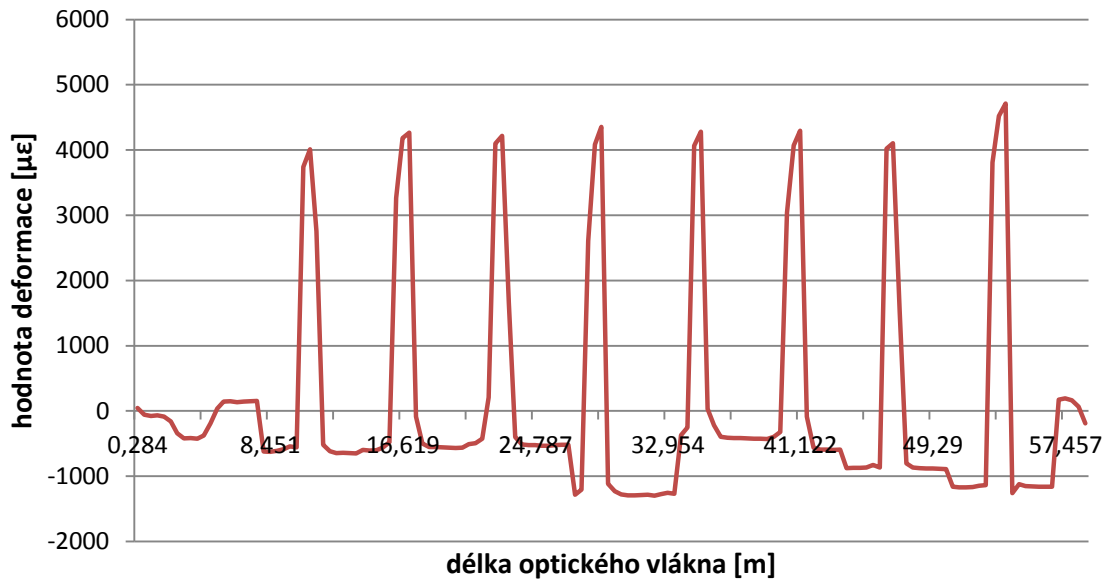
Deformace přípravku na 100 cm



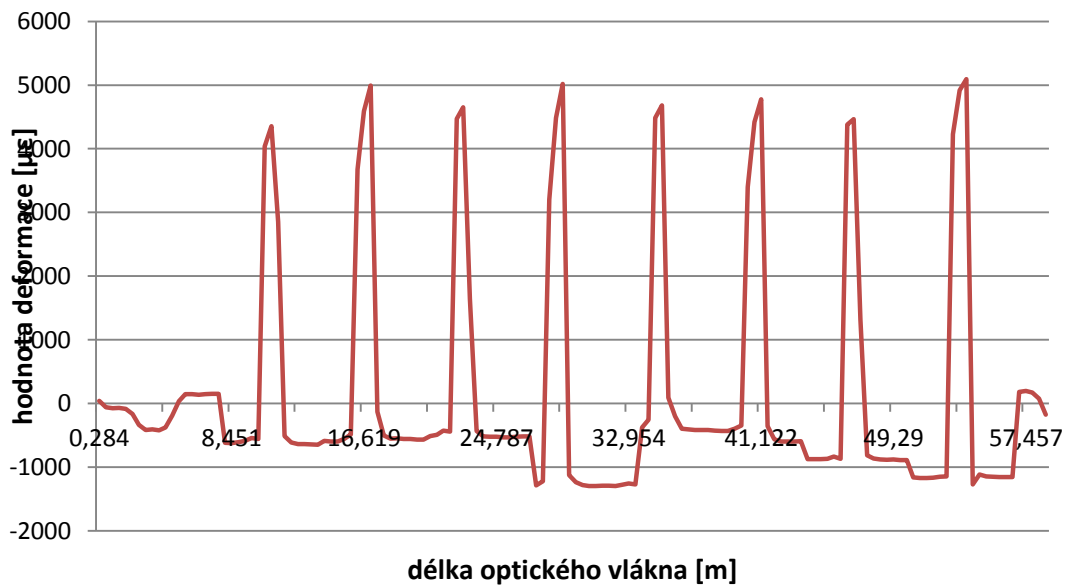
Deformace přípravku na 90 cm



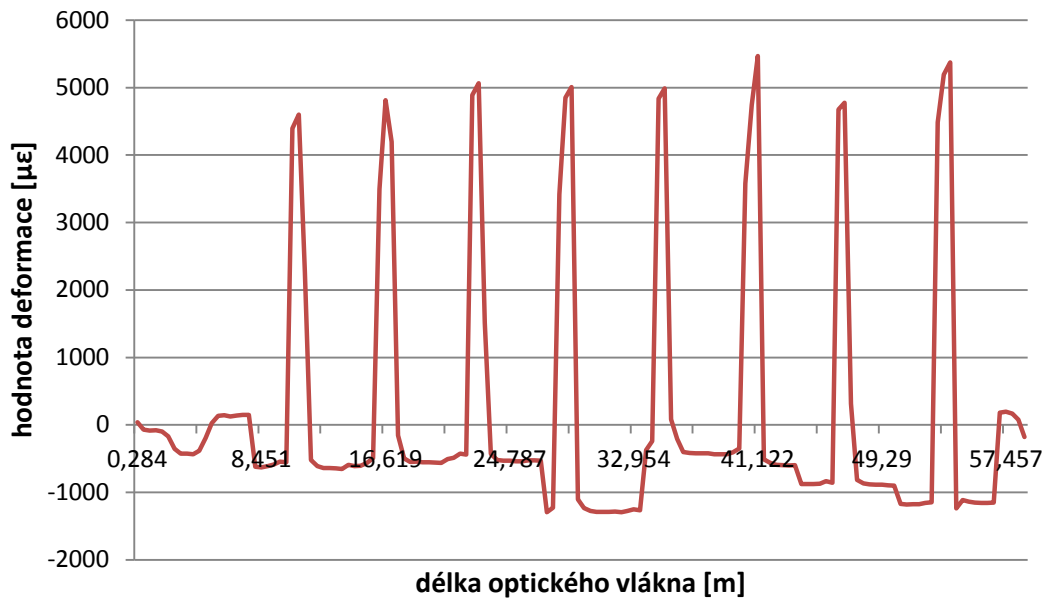
Deformace přípravku na 80 cm



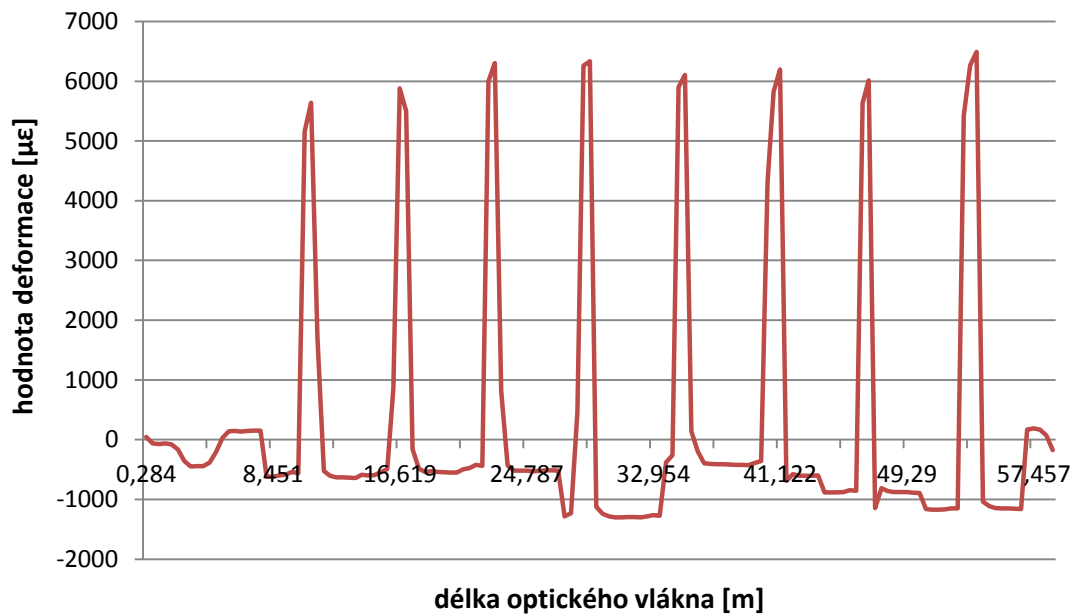
Deformace přípravku na 70 cm



Deformace přípravku na 60 cm



Deformace přípravku na 30 cm



Příloha B: Graf zobrazující všechny deformace

