VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021 Bc. Matěj Kubica

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTICKÝ POLYGON
OPTICAL POLYGON

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Matěj Kubica

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Matěj Kubica ***ID:*** 195373

Ročník: 2 ***Akademický rok:*** 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Optický polygon

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh a realizace testovacího polygonu pro optické vláknové sítě v rámci pracoviště Ústavu telekomunikací VUT Brno. Polygon bude obsahovat různá optická vlákna, která budou změřena přímou a reflektometrickou metodou. Pro simulaci delších vzdáleností bude navržena a realizována/ve výrobě racková skříň pro 3 cívky vláken (v programu Fusion360), dále bude realizován venkovní polygon (provaření vláken v šachtách). Součástí návrhu bude realizace dokumentace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KEISER, Gerd. Optical fiber communications. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Companies, c2011. ISBN 0073380717.

[2] FILKA, Miloslav, 2017. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol. ISBN 978-80-86785-29-5.

Termín zadání: 1.2.2021 ***Termín odevzdání:*** 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:
Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o problematice optických sítí z hlediska pokládky kabelů a práce s jednotlivými optickými vlákny. Práce obsahuje rozbor základních fyzikálních vlastností, které jsou využívány ve vláknové optice. Zároveň je rozebrána správná metodika při práci s optickými vlákny. Práce obsahuje detailní dokumentaci realizovaných optických propojů, včetně schéma realizace venkovního zapojení. Obsahem je také 3D návrh rackové skříně ve variantě 6U, který slouží pro uchopení optických cívek a poskytuje tak možnost simulace různě dlouhých optických tras.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické vlákno, optika, optické svařování, pokládka optických kabelů, 3D modelování

ABSTRACT

Diploma thesis focuses on a problematics of an optical networks in terms of an optical cables laying and a work with individual fibers. Thesis contains an basic physical properties which are used in a fiber optics. Methodology of correct working procedures used in fiber optics is discussed at the same time. Thesis also contains detailed documentation of realized optical connections including scheme of realized outdoor connection. 3D design of an rack case is also part of the thesis. Rack case provides an option to simulate plenty of different lengths of optical routes. Rack case is designed in 6U variant.

KEYWORDS

Optical fiber, optics, fusion splicing, laying of an optical cables cables, 3D modeling

KUBICA, Matěj. *Optický testbed*. Brno, 2021, 89 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

Vysázeno pomocí balíčku `thesis` verze 4.00; `http://latex.feec.vutbr.cz`

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optický testbed“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno ....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomáši Horváthovi, Ph.D. a panu doc. Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod **17**

1 Optická komunikace **19**
1.1 Úvod do optické komunikace 19
1.2 Elektromagnetické spektrum 21
1.3 Optická spektrální pásma 22

2 Optická vlákna a jejich vlastnosti **25**
2.1 Jednovidová vlákna se skokovou změnou indexu 26
2.2 Parametry optických vláken 27
2.2.1 Měrný útlum 27
2.2.2 Ztráty ohyby vlákna 28
2.2.3 Disperze 29
2.2.4 Numerická apertura a Snellův zákon lomu 30

3 Postupy svařování, spojování, měření, konektorování optických vláken **31**
3.1 Tavné svařování 32
3.2 Metody měření optických tras 34
3.3 Optické konektory 35

4 Dokumentace **37**
4.1 Dokumentace jednotlivých propojů 37
4.1.1 Propoj laboratoří SC5.35 a SC5.52 37
4.1.2 Propoj místnosti SD5.67 a laboratoře SC5.52 37
4.1.3 Propoj místnosti SD5.67 a laboratoře SC5.35 38
4.1.4 Propoj místnosti SD5.67 a místnosti SD5.62 38
4.1.5 Propoj místnosti SD5.67 a místnosti SE5.116 38
4.1.6 Propoj místnosti SD5.67 a místnosti SD5.69 41
4.2 Propoj místnosti SD5.67 a venkovních šachet 41
4.2.1 Propoj mezi místností SD5.67 a šachtou mezi budouvou T10 a T12 43
4.2.2 Vzájemný propoj mez šachtami 47

5 Měření a příprava optických vláken **51**

6 Racková sříň **57**
6.1 Dokumentace rackové skříně 57

Závěr **61**

Literatura **63**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **65**

Seznam příloh **67**

A Schémata zapojení optických van **69**

B Fotografie průběhu prací na polygonu **79**

C Fotografie měřených parametrů cívky a vany **83**

D Parametry jednotlivých komponentů rackové skříně **85**

Seznam obrázků

1.1 Schéma optického přenosu 20
1.2 Elektromagnetické spektrum 21
1.3 Závislost měrného útlumu na vlnové délce 23
2.1 Šíření paprsku jednovidovým vláknem se skokovým indexem lomu . . 26
2.2 Ztráty mikroohyby a makroohyby 29
3.1 Ztráty způsobeny axiálním posuvem, radiální a úhlovou odchylkou . 32
3.2 Diagram postupu při svařování vláken 33
3.3 Grafická ukázka často využívaných konektorů 36
4.1 Přehled zapojení portů vana SC5.35. 40
4.2 Situace jednotlivých propojených míst. 44
4.3 Fotografie zachycující umístěnía improvizované pracoviště pro kompletaci první šachty. 45
4.4 Fotografie zachycující přivedené kabely do optického boxu. 46
4.5 Fotografie zachycující práce v optickém boxu. 47
4.6 Fotografie umístění druhé šachty u budovy T7. 48
4.7 Fotografie průběhu prací v druhé šachtě u budovy T7. 49
4.8 Schéma zapojení propojů. 50
5.1 Graf měření reflektometrickou metodou špulky 184173 pro vlnovou délku 1310 nm. 53
5.2 Graf měření reflektometrickou metodou špulky 184173 pro vlnovou délku 1550 nm. 53
5.3 Graf měření reflektometrickou metodou šedé špulky s vláknem G.653 pro vlnovou délku 1310 nm. 54
5.4 Graf měření reflektometrickou metodou šedé špulky s vláknem G.653 pro vlnovou délku 1550 nm. 55
6.1 Zobrazení celkového renderu skříně 58
6.2 Zobrazení renderu prázdného dna. 59
6.3 Fotografie bočních ornamentů cívky. 59
6.4 Zobrazení renderu prvku pro uchycení cívky. 60
A.1 Přehled zapojení portů vana SC5.52. 69
A.2 Přehled zapojení portů vana SD5.67. 70
A.3 Přehled zapojení portů vana SD5.62. 71
A.4 Přehled zapojení portů vana SD5.67 směr SD5.62. 72
A.5 Přehled zapojení portů vana SD5.67 směr SE5.116. 73
A.6 Přehled zapojení portů vana SE5.116. 74
A.7 Přehled zapojení portů vana SD5.69 rack na stole. 75
A.8 Přehled zapojení portů vana SD5.69 rack pod stolem. 76

A.9 Přehled zapojení portů vana SD5.67 směr SD5.69. 77
B.1 Fotografie průběhu prací v prvním optickém boxu. 79
B.2 Fotografie finalizace prací v prvním optickém boxu. 79
B.3 Fotografie s již uzavřenými kazetami v prvním boxu. 80
B.4 Fotografie zatmelení vyvrtaných děr v optickém boxu. 80
B.5 Fotografie počátku prací ve druhé šachtě u budovy T7. 81
B.6 Fotografie průběhu prací ve druhé šachtě u budovy T7. 81
B.7 Fotografie finalizací prací v druhé šachtě u budovy T7. 82
C.1 Ukázka měření parametrů cívky. 83
C.2 Ukázka měření parametrů cívky. 83
C.3 Ukázka měření parametrů cívky. 84
C.4 Ukázka měření těla vany. 84
D.1 Parametry dna skříně. 85
D.2 Parametry bočnice skříně. 86
D.3 Parametry horního krytu skříně. 86
D.4 Parametry úchopu skříně. 87
D.5 Parametry prázdného dna skříně. 88
D.6 Parametry spodního čela skříně. 88
D.7 Parametry ornamentu úchopu cívky. 89
D.8 Parametry dna úchytu pro cívku. 89

Seznam tabulek

1.1 Blízké infračervené spekrální pásmo pro využití optické komunikace . 22
4.1 Útlumy jednotlivých vláken v propoji laboratoří SC5.52->SC5.35 . . 38
4.2 Útlumy jednotlivých vláken v propoji místností SD5.67->SC5.52 . . . 39
4.3 Útlumy jednotlivých vláken v propoji místností SD5.67->SC5.35 . . . 41
4.4 Útlumy jednotlivých vláken v propoji místností SD5.67->SC5.62 . . . 42
4.5 Útlumy jednotlivých vláken v propoji místností SD5.67->SE.5.116 . . 43
5.1 Přehled odhadovaných vložných útlumů sváru svářečkou 51
5.2 Přehled naměřených celkových útlumů a výsledných odečtených vzdáleností. 52

Úvod

Práce pojednává o základních principech optické komunikace, jak po fyzikální stránce, tak po stránce související s pokládkou optické kabeláže a práce s optickými vlákny. Práce mimo výše zmíněné obsahuje kompletní dokumentaci realizovaných vláknových propojů, včetně kompletní dokumentace zapojení. Součástí práce je i kompletní revize a náměry optických cívek přímou a reflektometrickou metodou. Zároveň byla pro tyto optické cívky navržena speciální racková skříň, která bude sloužit pro simulaci různě dlouhých vzdáleností.

Teoretický rozbor popisuje samotné počátky optické komunikace a následný vývoj. Pozornost je věnována především optickým vláknům, jakožto základnímu prvku veškerých komunikacích (datových i nedatových). Práce rozebírá jak, základní fyzikální jevy vyskytující se v optických vláknech, tak metodické postupy při svařování optických vláken. Za účelem správné volby vlnové délky a dalších vhodných parametrů pro přenos optickým vláknem je rozebráno elektromagnetické spektrum a doporučená pásma vlnových délek pro dané typy optické komunikace.

Z praktického hlediska je zobrazena veškerá práce na optickém polygonu, od úkonů týkajících se svařování optických vláken, po následné vypracování detailní dokumentaci realizovaného polygonu na ústavu telekomunikací. Jedná se jak o zapojení jednotlivých van v realizovaných propojích a jejich umístění v daných místnostech, tak realizované zapojení ve venkovních šachtách, které jsou součástí polygonu.

Část práce je taktéž věnována finálnímu návrhu rackové skříně v softwarovém programu Fusion 360. Navržená racková skříň je ve velikosti 6U a vyhovuje parametrově normě EIA-310, kdy skříň umožňuje uchycení 4 optických cívek. Navržený 3D model s danými parametry byl konzultován s firmou, která dle navrženého 3D modelu skříň realizuje.

1 Optická komunikace

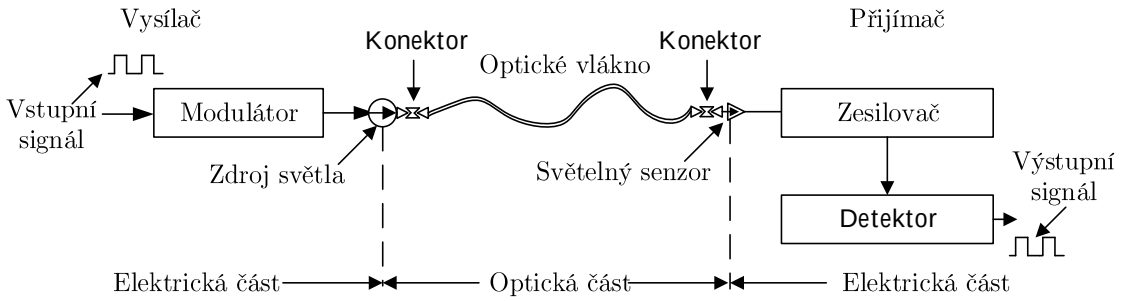
Již od dávných časů lidé hledali způsoby, jak vzájemně komunikovat, jak si zaslat určitý signál nebo zprávu z jednoho místa na druhou, aniž by se potkali. Za jednu z prvních metod optického přenosu či komunikace je považována metoda vysílání kouřových signálu. Tuto metodu využívali řekové v osmém století před našim letopočtem a byla využívána například k zaslání varovných signálů nebo volání o pomoc. Metoda byla velice limitující, jelikož vysílaní optického signálu bylo limitováno rychlostí pohybu rukou člověka jež zprávu odesílal a na druhé straně poté stál člověk, jehož oko bylo příjemce dané zprávy. Z toho je patrné, že metoda narazila na problémy při dešti, mlze a jiných nezpůsobilých atmosférických podmínkách. Od metody se nakonec upustilo, jelikož rychlejším, efektivnějším a spolehlivějším řešním bylo zaslat posla. Na všechny tři vlastnosti a nejen ty je kladen důraz u optické komunikace v současnosti. Roku 1880 došlo k prvnímu zvukovému bezdrátovému přenosu, po této události vznikla vize přenosu fotonu optickým vláknem, avšak trvalo dalších 80 let, než došlo k technologickému pokroku, jak v oblasti skleněných vláken, tak k vynálezu fungujícího laseru. V 60. letech 20. století, došlo právě k vynálezu laseru, který odstartoval vývoj v odvětví optické komunikace. Dalším milníkem byl vynález nízkoútlumových optických vláken, respektive využívání spektráního pásma v rozmezí 770 až 1675 nm. V 70. letech 20. století, započalo první testování a nasazování do provozu. Z počátku byla výroba vláken a laserů technologicky náročná a nákladná, což časem také odpadlo, kdy v současném stavu optické sítě nahrazují, zastaralé technologie nejen v páteřních částech sítí, ale zajišťují komunikaci, až ke koncovým uživatelům tzv. FTTx technologie (Fibre To The . . . , vlákno zavedeno do . . .). Dle místa ukončení je technologie specifikována například FTTH (Fibre To The Home, vlákno zavedeno do domu) [1, 2].

1.1 Úvod do optické komunikace

Nahrazování metalických sítí optickými, znamená mnohem více, než pouhý pohled, že se jedná o totéž, s jediným rozdílem v přenosových rychlostech. Je důležité uvědomit si rozdíl, že optická komunikace není to samé, co elektrická. Může se zdát, že světlo navázané ve vlákně se chová jako elektřina v metalickém kabelu, což není pravda a je to velice zavádějící. Světlo je elektromagnetická vlna a vlákno je vlnovod. Vše spojené s transportem signálu i pouhé svařování (spojování) dvou vláken, je odlišné od toho co se děje ve světě elektrickém. Ačkoli jsou tyto dva okruhy úzce spojeny, zaštítují je jiné principy a jiné fyzikální zákony.

Základní komponenty optického přenosového systému jsou zobrazeny ve schématu 1.1. Kdy posloupnost bitového streamu neboli vstupní elektrický signál vstu-

puje do modulátoru, který daný vstupní signál zakóduje, tak aby byl vhodný pro přenos vláknem. Zdroj světla, může být LED (Light Emitting Diode) dioda nebo laser, je řízen modulátorem a navazuje signál z modulátoru do optického vlákna. Světlo o určité vlnové délce λ se poté šíří vláknem k přijímači. Po cestě šíření světla vláknem může dojít k určitým typům ztrát, které můžou být zapříčiněny několika faktory, ku příkladu měrným útlumem, disperzí světla, útlumem spojek a dalšími. Všechny tyto jmenované vlastnosti jsou hrají důležitou roli u vláknové optiky. Přijímač na druhé straně následně detekuje světelný signál například pomocí fotodiody. Světelný signál je dále převeden do formy elektrického signálu. Tento signál je poté zesílen a přiveden do dalšího detektoru, který izoluje jednotlivé změny stavů a jejich časování. Následně je signál zrekonstruován a dekódován na původní vyslaný signál, který je na závěr přiveden do výstupního zařízení [1, 2, 3, 4].



Obr. 1.1: Schéma optického přenosu [4].

Využívání optických vláken pro přenos dat má značné výhody mezi které patří:

- Velikost a váha – optické kabely jsou značně lehčí a velikostně menší, pokud se vezme v potay to, že jeden optický kabel obsahuje několik vláken, dle typu kabelu. V porovnání s metalickými či koaxiálními kabely jsou tedy značně lehčí a při pokládce respektive skladování, jsoou úspornější, co se prostor týče,
- náklady – současné technologické možnosti umožňují výrobu a prodej optických vláken, za přijatelnou cenu v poměru cena/výkon, kdy optická vlákna nabízí vysoké přenosové rychlosti za přijatelnou cenu. Zároveň dokáží přenášet data na velké vzdálenosti spolehlivěji a efektivněji, využívají se například pro mezikontinentální podmořské přenosy,
- přenos na dlouhé vzdálenosti – přenos po optickém vlákně má mnohem menší ztráty oproti metalickým trasám, z toho plyne, že není potřeba využívat opakovače tak často, což opět snižuje cenu celého systému,
- kapacita vedení – optická vlákna mají mnohem větší šířku pásma než metalické vedení, z čehož plyne možnost zaslání většího množství informací,

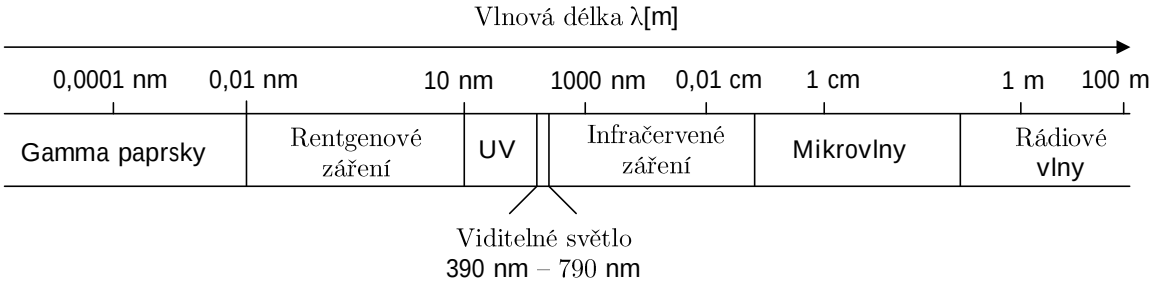
- odolnost vůči elektrickému rušení – jednou z důležitých vlastností je odolnost vůči elektrickému rušení, toto je další zásadní rozdíl oproti metalickému vedení, u kterého je právě toto rušení nevýhodou u některých instalací. Optické vlákno je vyrobeno z dielektrického materiálu, jako křemík či sklo, což umožnuje instalaci optických vláken i v oblastech, kde se právě toto rušení nachází,
- bezpečnost – optická vlákna sama o sobě nabízí vysoký stupeň zabezpečení dat, jelikož optický signál je vázaný do vlákna a neprůhledná vrstva, jež obklopuje vlákno, pohlcuje jakýkoli nežádoucí signál. Tato výhoda v porovnání s metalickým vedením je značná, jelikož elektrický signál může být relativně jednoduše odposlouchávánn [1, 3, 4, 5].

1.2 Elektromagnetické spektrum

Jak již bylo zmíněno, světlo je elektromagnetická vlna a veškeré telekomunikační systémy využívájí určitou formu elektromagnetické energie pro přenos signálu. Elektromagnetické vlny jsou ve své podstatě stejné jako vlny rádiové s tím rozdílem, že mají jinou vlnovou délku.

Elektromagnetická vlna se skládá ze dvou polí, elektromagnetického a magnetického. Obě tyto pole mají směr a sílu neboli amplitudu. V rámci elektromagnetické vlny jsou tyto dvě pole na sebe kolmá a pohybují se vždy tak, že v každém případě dojde k zachování kolmosti.

Elektromagnetická enerige je tedy kombinací těchto dvou polí a obsahuje rádiové vlny, mikrovlny, viditelné světlo, infračervené světlo, UV světlo, rentgenové záření neboli či gamma záření. Jednotlivé složky mají svou vlastní přiřazenou šířku v elektromagnetickém spektru. Rozdělení tohoto spektra je pak patrné z obrázku 1.2. Elektromagnetická energie zároveň roste s rostoucí vlnovou délkou [1, 3].



Obr. 1.2: Elektromagnetické spektrum.

1.3 Optická spektrální pásma

Pro aplikaci v optovláknové komunikaci se využívá blízkého infračerveného spektrálního pásma, což je pásmo v nominálním rozmezí 770 nm až 1675 nm. Vlnové délky 770 nm až 910 nm jsou poté využívány pro mnohovidová vlákna na kratší vzdálenosti. Mezinárodní telekomunikační unie, zkráceně ITU (International Telecommunications Union) standardizovala užší část spektrálního pásma jmenovitě 1260 nm až 1675 nm. Tuto užší část pásma rozdělila ITU na dalších šest subpásem pro využití optické komunikace.

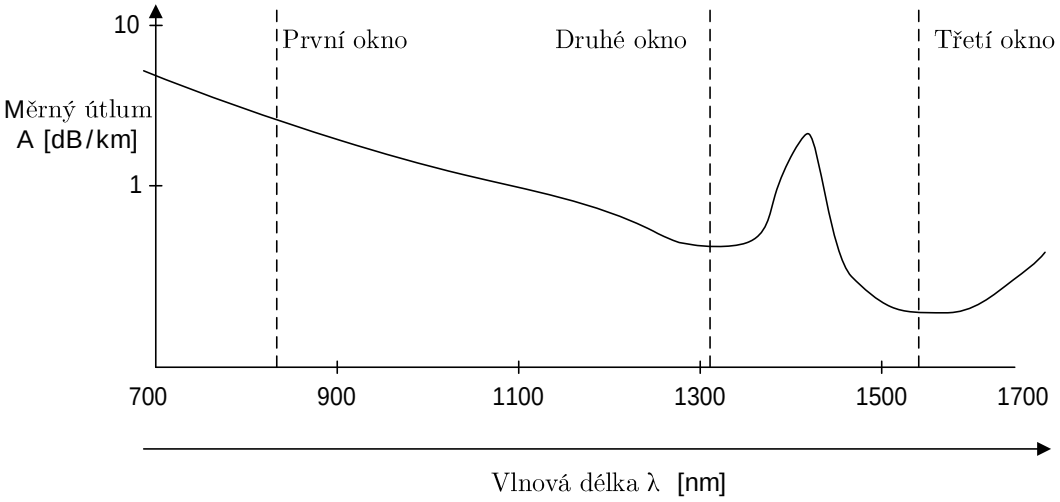
První pásmo je standardizováno mezi 1260 nm až 1360 nm, kdy toto pásmo je původní a vlnová délka z tohoto rozsahu byla jako první využita pro přenos přes jednovidové vlákno, odtud z anglického slovíčka original O-pásmo. Dalším standardizovaným pásmem je E-pásmo, které je využíváno pro jednovidová vlákna s nízkým obsahem příměsi hydroxylu OH, toto pásmo je nejméně využíváné, jelikož měrný útlum v tomto rozsahu je vysoký. S-pásmo využívá vlnových délek kratších než C-pásmo a delších než E-pásmo. C-pásmo je vyhrazeno pro vláknové eribiem dopované zesilovače zkráceně EDFA (Eribium Doped Fiber Amplifier) a zároveň v tomto okně mají vlákna nízký měrný útlum. Toto pásmo je využíváno pro mnoho druhů instalací a aplikací, od podmořských přenosů po metropolitní. Měrný útlum vláken v L-pásmu je také nízký, avšak o něco vyšší než měrný útlum v C-pásmu. U-pásmo je využíváno hlavně za účely monitoringu. Přehled standardizovaných pásem je možné vidět v tabulce 1.1.

Tab. 1.1: Blízké infračervené spekrální pásmo pro využití optické komunikace

Označení (zkratka)	Význam zkratky	Vlnová délka λ [nm]
O-pásmo	O = original (původní)	1260–1360
E-pásmo	E = extended (prodloužené)	1360–1460
S-pásmo	S = short (krátké)	1460–1530
C-pásmo	C = conventional (konvenční)	1530–1565
L-pásmo	L = long (dlouhé)	1565–1625
U-pásmo	U = ultra long (ultra dlouhé)	1625–1675

Volba spektra, respektive vlnové délky pro optické přenosy je závislá na zvoleném optickém systému a komponentech jeho trasy. Jak již bylo zmíněno, mezi tyto komponenty se řadí optická vlákna, zdroje světla, zesilovače a fotodetektory. Jelikož každý prvek optického systému je závislý na materiálu, je vhodné zvolit dle komponent systému správnou vlnovou délku, ať je měrný útlum co nejnižší. Na obrázku 1.3

jsou patrná tři tzv nízko útlumová okna, střed těchto oken je indikován vertikálními liniemi. Prvnímu oknu náleží oblast s kratšími vlnovými délkami, poté již zmiňované O-pásmo a C-pásmo. Ranné aplikace a instalace optických vláken zjistily, že první okno v rozmezí 770 až 910 nm je vhodné pro použití GaAlAs diod jako optických zdrojů a křemíkových fotodetektorů pracujících na těchto vlnových délkách. Jelikož vlnová délka kolem 1000 nm vykazovala vysoký měrný útlum skrze absorpci signálu vodními molekulami. Špička této absorpce není patrná skrze měřítko osy Y. Díky tomuto poznatku bylo stanoveno lokální minimum v prvním nízkoútlumovém okně kolem 850 nm.



Obr. 1.3: Závislost měrného útlumu na vlnové délce [1].

Pozdějším vývojem technologií a lepší výrobou optických vláken se podařilo redukovat koncentraci příměsi hydroxylu, což umožnilo vzniku dalších dvou nízkoútlumových oken, které se pohybují v rozmezí 1260 nm až 1675 nm. Sklo v tomto spektrální pásmu stále ještě obsahuje příměsi vodních molekul kolem vlnové délky 1400 nm, což je patrné z uvedeného obrázku. Tato absorpční špička zapříčinila rozdělení této části spektrálního pásma na dvě separatní nízkoútlumová okna. Druhé okno je centrováno s nejnižším měrným útlumem při 1310 nm a třetí okno při vlnové délce 1550 nm. Tyto okna se nazývají O-pásmo a C-pásmo.

Se současnými technologickými možnostmi dochází k odstranění téměř veškerých vodních molekul ze skleněných vláken, což umožňuje redukci absorpční špičky, mezi druhým a třetím oknem. Díky těmto technologickým procesům a výrobě, se tak naskytla možnost využití oblasti 1360 nm až 1460 nm, což je již popsané E-pásmo. Toto pásmo umožňuje pro přenosy dodatečných 100 nm spektrální šířky pásma.

Systémy operující na vlnové délce 1550 nm poskytují nejnižší měrný útlum, což je z grafu patrné, každopádně pokud dojde k použití křemíkových vláken na této vlnové délce, vzniká problém s disperzí signálu. Jelikož vlákno vyrobené z křemíku má vyšší útlum na vlnové délce 1550 nm než na vlnové délce 1310 nm. Postupem času však došlo k dalšímu technologickému pokroku, kdy možnost užití křemíkového vlákna na vlnové délce 1550 nm je nyní dostupná. Muselo dojít k vývoji speciálních vláken s posunutou disperzí takzvané NZDSF(Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber), tedy vlákno s nenulovou posunutou disperzí. Disperze a měrný útlum budou rozebrány v následujících kapitolách, jakožto důležité parametry optických přenosů [1, 3, 4].

2 Optická vlákna a jejich vlastnosti

Optické vlákno samotné se skládá ze dvou základních vrstev kulatého tvaru a to jádra, které je umístěno v centrální části vlákna a pláště, který kompletně obepíná jádro vlákna a tvoří tak obvod celku. Plášť jako takový neslouží k samotnému přenosu světla vláknem, tudíž by teoreticky vlákno jako celek nemuselo obsahovat plášť. Každopádně plášť hraje důležitou roli z praktického hlediska, kdy slouží například k ochraně povrchu jádra od nedokonalostí či nežádoucím změnám indexu lomu. Tyto změny mohou být způsobeny fyzickým kontaktem, nečistotami či jinými mechanickými vlivy. V neposlední řadě zajišťuje zvýšení mechanické pevnosti. Jádro má lehce vyšší index lomu než plášť, proto když dopadající úhel vstupního svazku světla je větší než kritický úhel definovaný Snellovým zákonem, je vstupní svazek světla navázán do jádra a probíhá tak jeho šíření v jádru vlákna. Světlo je schopno šířit se vláknem na dlouhé vzdálenosti, jelikož je světlo neustále odráženo zpět do jádra vlákna totálním odrazem na rozhraní jádro-plášť. Šíření světla vláknem jak již bylo zmíněno je šíření elektromagnetické vlny, tyto šířící se vlny vláknem se nazývají vidy, což jsou vzory distribuce elektromagnetického pole. Vlákna jako taková mohou vést určitý počet oddělených vidů, tento počet je potom závislý na podmínkách elektrického a magnetického pole, materiálu, parametrech vlákna a vlnové délce.

Optická vlákna mohou být dělena do dvou typů, jednovidová vlákna a vlákna mnohovidová. Jednovidová vlákna jak plyne z názvu jsou schopna vést pouze jeden vid vláknem, na druhé straně vlákna mnohovidová jsou schopna vést více vidů vláknem. Tyto vlákna jsou dále dělena podle změny indexu lomu ve vlákně a to buď vlákna se skokovou změnou indexu nebo vlákna gradientní neboli vlákna s postupnou změnou indexu lomu. Vlákna se skokovou změnou indexu mají konstantní index lomu v celém jádře. Index lomu se začíná měnit skokově až na rozhraní jádro-plášť. Změna indexu lomu u gradientních vláken je postupná, změna indexu lomu postupně klesá jako radiální funkce vzdálenosti od středu jádra. Z obrázku 2.1 je patrné šíření paprsku jednovidovým vláknem se skokovým indexem lomu. Jedním z rozdílových faktorů u těchto vláken je ve vidová disperze, což je jeden z parametrů, který bude podrobněji rozebrán v následujících kapitolách.

Ve zkratce řečeno, v případě navázání paprsku do mnohovidového vlákna je optický výkon pulzu rozprostřen do velkého množství vidů šířících se skrze vlákno. Různé vidy mají poté různou rychlost šíření vláknem, z čehož plyne, že různé vidy i přes to, že byly do vlákna navázány ve stejnou chvíli, dorazí na výstup vlákna v jiných časových úsecích. Výstupní impuls se tak rozšiřuje v závislosti na čase, podle toho, jak dlouhý časový interval stráví ve vlákně. Tento jev se nazývá právě vidová disperze a vyskytuje se hlavně u mnohovidových vláken se skokovým indexem lomu. Mnohovidová vlákna mají obecně problém s již zmíněnou vidovou disperzí a to

hlavně u mnohovidového vlákna se skokovou změnou indexu. Rozšiřování pulzů, způsobené vidovou disperzí, značně limituje přenosové kapacity mnohovidových vláken. Jelikož se rozšířené pulzy se mohou vzájemně překrývat, dochází například ku mezisymbolové interferenci či k požkození původního vstupního signálu, což způsobuje zvětšenou bitovou chybovost.

Dále mohou být optická vlákna kategorizována dle použitého materiálu při výrobě. Můžou to být například vlákna polymerová či z křemenného skla. Druhá zmíněná vlákna mají široké spektrum využití. Mez hlavní oblast užit patří dálkové přenosy, jako podmořské či mezikontinentální. Se současnými technologickými možnostmi se vyskytla také možnost využití křemenných vláken pro aplikace v domácích LAN (Local Area Network) sítích, nemocnicích, firmách, kancelářích a dalších [3, 4, 6, 7].

Obr. 2.1: Šíření paprsku jednovidovým vláknem se skokovým indexem lomu [6].

2.1 Jednovidová vlákna se skokovou změnou indexu

Jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu má typicky průměr jádra 5–10 μm, nejčastěji však 9 μm. Průměr pláště je poté 125 μm. Schopnost, pod jakým úhlem je možnost navázát optický výkon do vlákna, tedy numerickou aperturu, která bude popsána také v následujících kapitolách, 0,08–0,15. Jelikož jednovidové vlákno má malý průměr jádra, je tedy možnost existence pouze jediného, tedy základního vidu šířícího se vláknem. Jednovidová vlákna mají velice nízký měrný útlum, nízkou disperzi a velkou šířku pásma, což souvisí s přenosovými rychlostmi, které je možno dosáhnout při použití toho typu vlákna. ITU standardizovala tyto vlákna dle druhu použití ve svý standardech G.652–G.657, kde v těchto standardech je možné nalézt parametry pro daný typ vlákna. Každý standard má své typické využití, kdy například standard G.652 je klasické jednovidové vlákno s rozměry 9/125 μm a jeho modifikace G.652.D je nejpoužívanějším typem optického vlákna [3, 5, 6, 7, 8].

2.2 Parametry optických vláken

Optická vlákna musí splňovat mnoho kritérií, jak technologických postupů užitých při výrobě, tak co se týče parametrů a vlastností samotných již vyrobených optických vláken. Mezi základní parametry optických vláken jsou řazeny vlastnosti jako měrný útlum, disperze, numerická apertura, šířka pásma a další.

Šířka pásma se udává v MHz · km. Šířka pásma jako parametr udává kmitočet, který je přenesen na vzdálenost jednoho kilometru, aniž by došlo k přílišnému zkrezlení signálu vlivem například disperze. Šířka pásma závisí jak na materiálu optického vlákna, tak na vlnové délce optického signálu [3, 6, 9].

2.2.1 Měrný útlum

Měrný útlum je podstatným parametrem při plánování optického komunikačního systému, kdy tento parametr udává míru útlumu světelného signálu při průchodem vlákna o určité vzdálenosti. Z toho plyne, že dle tohoto parametru je možno určit maximální vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem, případně maximální vzdálenost umístění zesilovače, potřebného pro regeneraci signáu. Z výše zmíněného je patrné, že optický výkon navázaný do vlákna klesá s rostoucí vzdáleností od zdroje.

Aby mohlo dojít k odvozená vztahu pro měrný útlum, musí nejprve dojít k definici samotného útlumu. Útlum je definován jako poměr vstupního světelného výkonu P_1 a výstupního světelného výkonu P_2 pro danou vlnovou délku. Vztah pro útlum je poté patrný z rovnice 2.1 a je udáván v dB.

$$A = 10 \cdot log \cdot (\frac{P_1}{P_2}). \tag{2.1}$$

Z výše zmíněné rovnice je nyní možnost určit vztah pro měrný útlum. Pro klasifikaci měrného útlumu vlákna, který je vztažen na jednotku kilometru, je definován výpočetní vztah, který je patrný z rovnice 2.2, kde l je délka. Jednotkou měrného útlumu je dB / km.

$$\alpha = (\frac{A}{l}). \tag{2.2}$$

Ztráty optického signálu mohou být způsobeny například absorpcí či rozptylem signálu. Absorpce je způsobena materiálovými vlastnostmi vlákna, kdy dochází k pohlcení určité části optického výkonu molekulami materiálu. Absorpce může být způsobena rozdílnými mechanismy, ku příkladu absorpce způsobená molekulární a atomickou strukturou vlákna, vnější abosrpcí nečistot v materiálu vlákna a dalšími způsoby. Část optického výkonu tedy pohltí samotné molekuly materiálu vlákna, tedy takzvanná vlastní absorpce. Další část je pohlcena nečistotami ve vlákně, tedy nevlastní abosrpce. Z tohoto důvodu je nutné dbát na čistotu při výrobě vláken,

jelikož právě při výrobě žíháním zůstávají ve vlákně ionty hydroxylu, které způsobují značnou absorpci signálu. Mezi nejvýznamnější nečistoty patří ionty kovů Fe, Cr a další.

Ztráty signálu způsobeny rozptylem vznikají na mikroskopických nehomogenitách vlákna. Rayleighův rozptyl vzniká jako důsledek kolize optického záření, které se šíří vláknem a molekul hmoty jádra optického vlákna. Při této kolizi se část parpsku šíří dále v nezměněném směru a část se roztříští do jiného směru. Toto rozptýlené záření poté proniká do pláště a zaniká. Ztráty rozptylem vznikají z toho důvodu, že sklo je amorfní látka a nemá tak krystalickou mřížku s pravidelným uspořádáním, naopak molekuly materiálu jsou náhodně rozložený a tvoří mikronehomogenity, které právě způsobují rozptyl. Z tohoto poznatku plyne, že rozptyl je vždy přítomen [3, 9].

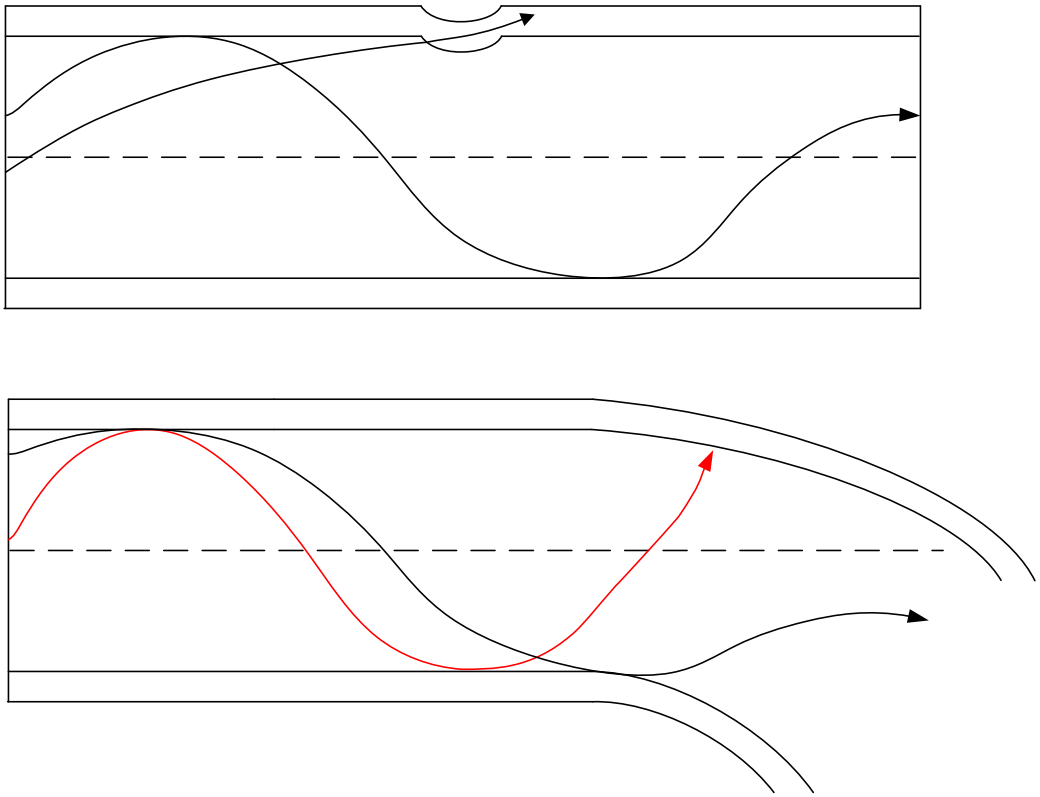
2.2.2 Ztráty ohyby vlákna

Při pokládce či tažení optické kabeláže by byla ideální trasa rovná, bez záhybů a odboček, to v praxi není snadno realizovatelné a tak nastává při plánování tras snaha minimalizovat odbočky a záhyby, jelikož ohyby vlákna mohou způsobit, překročení hodnoty mezního úhlu a následnému nežádoucímu vyvázání paprsku z jádra do pláště a tedy další ztráty. U samotných vláken výrobci uvádějí poloměr ohybu vlákna, které je nutno dodržovat. Čím větší je průměr jádra vlákna, tím je větší minimální poloměr ohybu. Ztráty způsobení ohyby vlákna lze dále dělit na ztráty mikroohby a makroohyby.

První zmíněné jsou způsobeny chybami v geometrii vlákna. Vznikají jak při výrobě, tak také při mechanickém působení jiných předmětů na vlákna potažmo na kabely. V případě, ať už vnějším vlivem nebo při výrobě, že dojde k deformaci pláště a ohybu vlákna, dochází ke vzniku problému a možnosti, že některý vid, vlivem této nerovnosti, se odrazí pod velkým úhlem a opět dojde k vyvázání mimo jádro vlákna.

Makroohyby jsou zapříčiněny zmíněnými odbočkami v trasách a jsou běžné. V případě, že ohyb vlákna je pod určitou mez poloměru křivosti, je možnost že dojde k vyvázání paprsku z vlákna a opět k růstu útlumu. Velikost útlumu je závislá na průměru ohybu vlákna. Způsoby vzniku ztrát makroohyby respektive mikroohyby jsou zobrazeny na obrázku 2.2. Kde horní obrázek jsou ztráty mikroohyby a dolní makroohyby.

Další ztráty signálu mohou být zpsobeny také špatnou montáží, svařováním vláken, případně spojkováním vláken. Tyto další typy ztrát, jako ztáty axiálním posuvem, radiální odchylkou či úhlovou odchylkou budou rozebrány v následující kapitole [3, 5, 9].



Obr. 2.2: Ztráty mikroohyby a makroohyby [9].

2.2.3 Disperze

Disperze je hlavní příčinou zkreslení signálu při průchodu vláknem. Disperzi je možno dělit na vidovou, chromatickou a polarizační.

Vidová disperze se vyskytuje u mnohovidových vláken, u kterých způsobuje, že každý paprsek dorazí díky rozdílnosti délek drah na druhý konec vlákna v jiných časových okamžicích. Výstupní impulz oproti vstupnímu se liší amplitudou i tvarem oproti vstupnímu impulzu. Při průchodu vidů vláknem na velké vzdálenosti, právě vlivem vzdálenosti a různými délkami drah dochází k rozšiřování ipmulzů jednotlivých vidů, kdy při dostatečně velké vzdálenosti může dojít k interferenci, tedy zkreslení signálu. Výsledný signál tak bude zkreslený a jeho amplituda bude taktéž nižší. Vidová disperze omezuje šířku pásma a tím tedy i přenosové rychlosti vlákna.

Chromatická disperze vzniká díky zdrojům záření. Zdroje záření nejsou ideálně monochromatické a jejich optické záření obsahuje určité spektrum vlnových délek. Jelikož každá vlnová délka má odlišnou rychlost šíření a zároveň s odlišnou vlnovou délkou se mění index lomu, vzniká tak opět problém s opožděním spektrálních složek

zdroje světla na konci vlákna.

Polarizační disperze vzniká u jednovidových vláken, kdy jediný vid šířící se vláknem se šíří ve dvou polarizačních rovinách, které jsou si vzájemně kolmé. Jakákoli kruhová nesymetrie, například způsobená ve výrobě či mechanickým tlakem nebo mikroohyby způsobuje šíření obou polarizací jinou rychlostí, což opět způsobuje rozšíření impulzu a zkreslení signálu [3, 4, 9].

2.2.4 Numerická apertura a Snellův zákon lomu

Numerická apertura je úhel, pod kterým je světelný paprsek navázán do optického vlákna, aby došlo k následnému šíření paprsku jádrem vlákna. Značí se NA a je rovna sinu maximálního úhlu Φa, pod kterým se vstupující paprsky šíří od začátku vlákna do jeho konce. Paprsky, které dopadají pod větším úhlem než je úhel Φa se již vláknem šířit nebudou, nenastane tak navázání paprsku do vlákna. Čím je tento úhel větší, tím je schopnost navázat optický výkon do vlákna větší. Základní podmínkou, aby došlo k navázání optického výkonu do vlákna a následnému šíření paprsku vláknem je úplný neboli totální odraz paprsku na rozhraní jádro-plášť. Dojde-li k překročení velikosti kritického úhlu paprsku vzhledem k ose vlákna, dojde k lomu paprsku na styku jádra s pláštěm, paprsek se tak dále neodrazí, naopak projde do pláště, kde poté nastane vyvázání ven z vlákna. Vyjádření rovnice pro numerickou aperturu je pak v rovnici 2.3. Kde index n_1 je index lomu materiálu jádra a n_2 je index lomu materiálu pláště.

$$NA \;=\; \sin \Phi_{max} \;=\; \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \tag{2.3}$$

Numerická apertura úzce souvisí se Snellovým zákonem lomu, kdy Snellův zákon lomu popisuje, šíření záření v dvou různých prostředích respektive přechod z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího a naopak. Obecně je možno Snellův zákon lomu vyjádřit viz rovnice 2.4. Kde index n_1 a n_2 jsou indexy lomu dvou různých materiálů a úhly α_1 a α_2 vyjadřují úhel dopadu respektive úhlel odrazu. Dle úhlu dopadu můžou nastat tři případy, lom od kolmice, lom ke kolmici či totální odraz. Totální odraz nastává, když paprsek prostupuje z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí a dopadající úhel je větší než úhel mezní, který určuje, kdy ještě dojde k lomu světla [3, 4, 9].

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 \;=\; n_2 \cdot \sin \alpha_2. \tag{2.4}$$

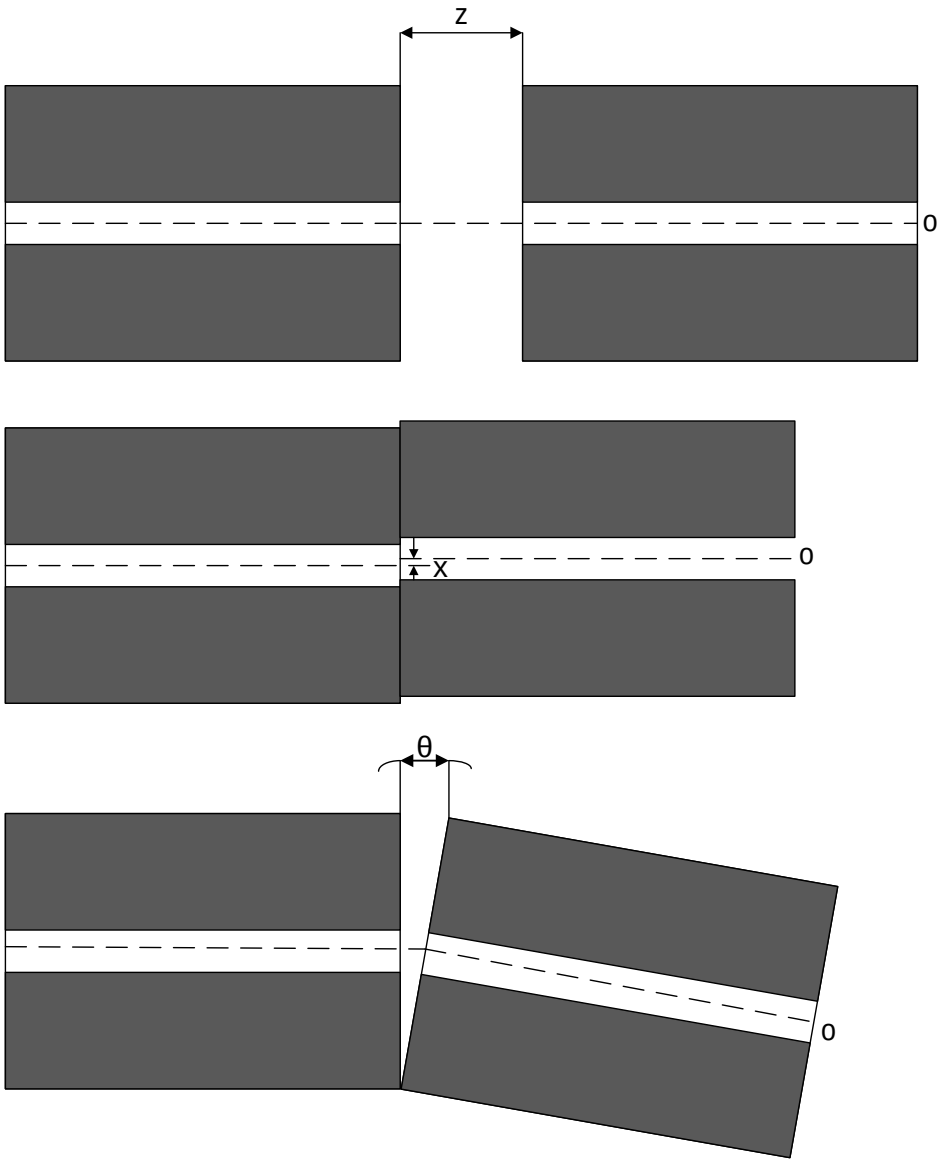
3 Postupy svařování, spojování, měření, konektorování optických vláken

Svařování optických vláken je proces, kdy dvě samostatná vlákna jsou spojena v jedno pomocí pevného sváru. V ideálním případě by tento svár měl nulový vložný útlum a byl dokonale pevný. Samotný proces svařování optických vláken by v ideálním případě byl rychlý, levný a nevyžadoval zvláštní nářadí. Dosažení všech těchto ideálních případů, je prakticky nemožné a tak je dbáno na metodické a technologické postupy, k dosažení co možná nejlepších výsledků. Svařování vláken je řazeno do metod permanentního spojení optických vláken, do stejné kategorie jsou řazeny i lepené spoje či mechanické. Na druhé straně existuje i možnost semipermanentního spojení dvou vláken.

Jak plyne z názvu semipermanentní spojení není trvalé a principiálně se jedná o vložení dvou vláken do spojky neboli konektoru. U této metody byla vize malých nákladů, protože ke spojení dvou vláken tímto způsobem není třeba žádné svářečky, která je sama o sobě dosti nákladná. Každopádně se metoda setkala s relativně velkými vložnými ztrátami, které se pohybují v rozmezí 0,2–0,6 dB. U metody je třeba klást důraz na správné nastavení obou vláken do konektoru. Je potřeba, aby byla zajištěna souosost vláken a zároveň nastává nutnost, dodržet vzdálenost mezi vlákny, tak aby se čelní plochy obou vláken nestýkaly. Souosost je zajišťována fixačními přípravky. Metoda se příliš nevyskytuje.

Obecně při spojování vláken nastává riziko výskytu axiálního posuvu či radiální respektive úhlové odchylky. Axiální posuv vzniká, při přílišné vzdálenosti čelních ploch dvou vláken od sebe ale i při přílišné vzdálenosti ferulí konektorů od sebe. Pokud je mezera mezi dvěmi vlákny příliš velká, nedochází k navázání optického výkonu z prvního vlákna do druhého, paprsek tak proniká místo do jádra druhého vlákna do pláště nebo úplně mimo druhé optické vlákno. Ztráty způsobené radiální odchylkou jsou způsobeny nedokonalou vzájemnou souosostí jader vláken nebo rozdílnými průměry jader vláken. Z tohoto důvodu je kladen důraz na souosost při spojování vláken, čím je přesnější vzájemná souosost, tím je svár respektive spojení vláken kvalitnější a tím je menší vložný útlum. Pokud jsou osy vzájemně rozdílně posunuty, opět nastává problém s navázáním paprsku z jednoho vlákna do druhého. Ztráty způsobené úhlovým posuvem jsou v současném stavu menší, díky technologickým možnostem a výrobě ferulí. Obecně vlákna mají nižší citlivost na ztráty způsobené touto odchylkou. Všechny tři typy ztrát vyskytující se při spojování vláken jsou zobrazeny 3.1. Kdy nejprve jsou zobrazeny ztráty axiálním posuvem, v závislosti na vzdálenosti z, poté ztráty radiální odchylkou, s naznačením vzájemného posuvu os vláken a na závěr ztráty vzniklé úhlovým posuvem, kdy většinou numerická apertura

je dostačující a paprsek se naváže do vlákna i přes úhlovou odchylku.



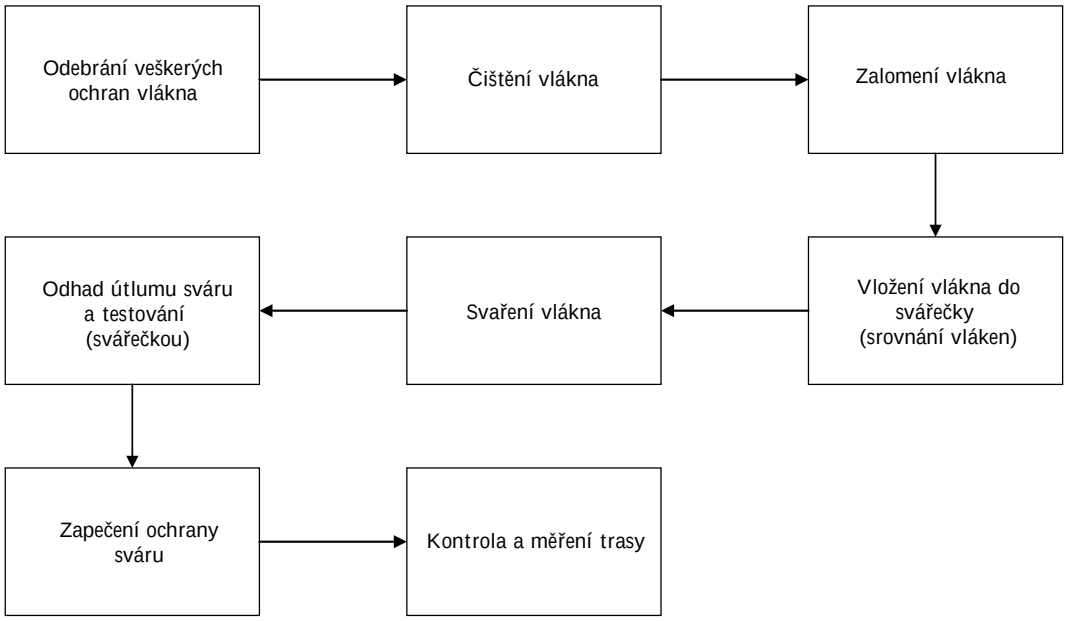
Obr. 3.1: Ztráty způsobeny axiálním posuvem, radiální a úhlovou odchylkou [9].

Významnější roli v oblasti spojování vláken hrají spoje permanentní a to hlavně tavné svařování vláken [3, 10].

3.1 Tavné svařování

Do permanentních spojů je řazena také metoda metalických spojek a metoda lepení vláken, každopádně tyto dvě metody nejsou tak důležité a používané jako metoda tavného svařování.

Techniku tavného svařování je možno rozdělit do několika základních úkonů, postup těchto úkonů je naznačen v diagramu 3.2.



Obr. 3.2: Diagram postupu při svařování vláken [10].

Před samotným svařováním je potřeba nejdříve odebrat veškeré polymerové ochrany vlákna, jak primární, tak případně sekundární. Následuje čištění obou vláken. Čištění je prováděno lihem či isopropylem. Důležité je po očištění vláken nevnášet nečistoty na vlákna, to znamená nedotýkat se jich či nimi neotírat o jiný materiál, mohlo by dojít ke značnému znečištění, což by mělo za následek nekvalitní svár. Dalším krokem je zalomení holého vlákna, zalomení musí být precizní, tak aby čelní plochy obou vláken byly kolmé na středovou osu jádra vlákna, ideálně bez nerovností. Po zalomení dochází ke vložení jednotlivých vláken do optické svářečky. Starší typy optických svářeček nejsou schopny vlákna vůči sobě srovnat v obou osách, po většinou jsou schopny vlákna srovnat jen v jedné ose, z toho plyne nutnost dávat pozor i na vkládání vláken, tak aby byly vlákna vůči sobě souměrně vyrovnány. Novější typy optických svářeček si dokáži vlákna vycentrovat vůči sobě jak podle osy x tak podle osy y. Tyto svářečky obecně dosahují kvalitnějších svárů s menšími vložnými útlumy. Většina svářeček po svaření vláken počítá odhad vložného útlumu sváru a provádí testování vlákna. Jelikož je veškerá ochrana vlákna na počátku odstraněna, nastává nutnost obnovení ochrany vlákna. Ochrana vlákna bývá obnovena speciální plastovou trubičkou, která v sobě obsahuje ocelový drát, který slouží jako opora sváru a chrání jej před mechanickými vlivy. Aby tato trubička držela v místě, kde došlo ke svaření vláken, zapíká se v pícce, kterou povětšinou bývají svářečky

vybaveny. Tato trubička je vlivem teploty smrštěna kolem sváru a tvoří tak jeho ochranu. Posledním krokem většinou bývá měření celého úseku, na kterém byl svár realizován, aby došlo ke zjištění zdali byl svár proveden kvalitně a nevkládá přílišný vložný útlum do trasy. Mezi základní metody patří měření pomocí reflektometru OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) a měření přímou metodou [3, 10, 12].

3.2 Metody měření optických tras

Měření optickým reflektometrem je velice efektivní dle nastavení samotného reflektometru je možnost uzpůsobit měření dle délky trasy. Reflektometr využívá metodu zpětného rozptylu. Je to metoda nedestruktivní a jejím základem je měření Rayleighova rozptylu. Do vlákna je možné vysílat pulzy o délce nanosekund až mikrosekund, tyto pulzy jsou důsledkem Rayleighova rozptylu na nehomogenitách v jádře a vlivem zpětných odrazů na konektorech, čátečně odraženy zpět na začátek trasy, kde jsou pulzy detekovány a vyhodnoceny. Fotodioda je velice citlivá a je schopna detekovat velmi slabé výkony. Reflektometr obsahuje DSP (Digitální Signálový Procesor) jednotku, která vyhodnocuje a průměruje přijaté zpětně odražené pulzy. Z výkonu zpětně odraženého pulzu lze zjistit úroveň signálu v daném bodě trasy a celkový útlum vybraného úseku trasy. Díky znalosti času šíření pulzu, indexu lomu vláken, vlnové délce, je možno spočítat rychlost puluzu a vzdálenost místa odrazu od počátku trasy. Na displeji je poté zobrazen průběh útlumu trasy, který je funkcí vzdálenosti od počátku trasy. Měření lze provádět na různých vlnových délkách a je možnost zjistit jím nejen poruchy trasy, ale také nekvalitní sváry, útlumy svárů, útlumy úseků trasy, délku trasy a další. Samotný reflektometr je drahý přístroj, což je nevýhodou této metody, každopádně zajišťuje mnoho možností měření a detekcí, výsledky jsou rychlé a přesné při použití správného nastavení, zároveň stačí měřit pouze z jednoho místa.

Další využívanou měření optických tras je přímá metoda. Přímá metoda spočívá v zapojení vysílače na jednu stranu a přijímače na druhou stranu, metoda je jednoduchá a nenáročná. U této metody dochází ke zjištění pouze celkového útlumu trasy a nedochází k detekci místa poruchy či vložných útlumů spojek. Z měření trasy na vlnových delkách 1310 nm a 1550 nm, existuje možnost jisté detekce míry či četnosti ohybů v trase. Tato detekce plyne z poznatku, že vlnová délka 1310 nm je na ohyby méně citlivá a naopak vlnová délka 1550 nm je na ohyby citlivější. Z toho plyne poznatek, že při častém výskytu ohybů na trase, bude útlum vyšší při měření na vlnové délce 1550 nm, než při měření na vlnové délce 1310 nm. Pokud však na měřeném úseku bude minimum ohybů, pak měření na vlnové délce 1550 nm bude vykazovat nižší útlum než druhá zmíněná vlnová délka. Metoda je levnější, avšak neposkytuje tolik možností jako měření reflektometrem, zároveň nastává potřeba přístupu na

obě strany trasy, tak aby došlo k umístění jak vysílače, tak na protistraně přijímače [3, 10, 11, 12].

3.3 Optické konektory

Optické konektory slouží k mechanickému spojení a zarovnání jádra vláken, tak aby došlo k navázání optického výkonu do druhého vlákna. Nevýhodou optických konektorů, oproti svařování vláken je, že vkládají do trasy větší útlum než permanentní spojení vláken. Optický konektor se skládá z ferule, těla a krytu konektoru. Ferule je vodicí kolík s dosedací plochou konektoru, nachází se uprostřed samotného konektoru. Bývá vyrobena z keramiky či vysoce kvalitního plastu. Dosedací plocha se leští do hladka, tak aby samotný konektor měl co nejnižší vložný útlum do trasy. Tělo konektoru je plastová či kovová konstrukce, která obepíná ferruli. Kryt konektoru upevňuje konektor na místě například při zasunutí do zásuvky.

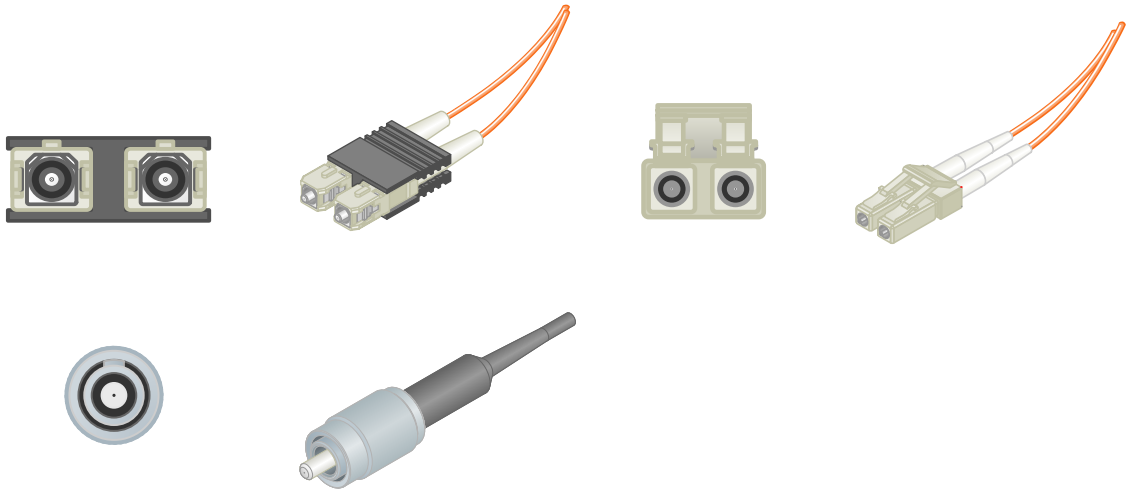
Optických konektorů je široké spektrum a jejich výběr může hrát v určitých případech důležitou roli, jelikož se všechny konektory od sebe liší jak broušením ferule vlákna, tak samotným kontaktem. Broušení i typ kontaktu mají vliv na vložný útlum konektoru. Nejpoužívanějším typem konektorů jsou konektory s přímým čelním kontaktem. Dle typu broušení ferule konektoru je opět možno rozdělit konektory do několika kategorií. Mezi základní typy broušení je řazeno broušení typu Flat (rovinné) PC (Physical Contact), PC a APC (Angled Physical Contact). Broušení typu Flat PC je rovinné broušení, ztráty se pohybují kolem 0,3 dB. Broušení typu PC je mírně zakřivené broušení, kdy se konektory stýkají pouze ve středu, ztráty jsou opět kolem 0,3 dB. APC broušení je šikmé broušení pod úhlem 8 stupňů. Konektory s tímto typem broušení mají nejmenší vložný útlum a jsou hojně využívány [13, 14].

Konektorů je mnoho, ale mezi základní v současné době se řadí následující:

- SC (Standard či Subscriber Connector) konektor – obsahuje feruli s velikostí 2,5 mm. Jsou dosti využíváné, jak například v media konvertorech, tak v lokálních sítích. Tento typ konektoru je vhodný jak pro jednovidová vlákna, tak pro mnohovidová. Samozřejmostí je podpora Gbitových přenosů. Vložný útlum je standartně u jednovidových vláken 0,2 dB. Konektor využívá zásuvného mechanismu zacvaknutí. Nahradil tak ST konektory, které jsou bajonetového typu a v současné době se již moc nevyužívají.
- FC (Fiber Connector) konektor – Konektory tohoto typu mají ferruli velikostně stejně velkou jako konektory SC, avšak využívá se hlavně u mnohovidových vláken. Častou aplikací tohoto konektoru je nasazení u CATV (Community Antenna Television).

- LC (Little Connector) konektor – ve sé podstatě se jedná o zmenšenou verzi SC konektoru, kdy průměr ferule činí 1,25 mm, tedy poloviční oproti SC konektoru. Použitím jsou vhodné pro jednovidová vlákna i pro mnohovidová. V současné době má tento typ konektoru široké spektrum využití, například v SFP (Small Form-factor Pluggable) modulech. Konektor svou kvalitou dosahuje vložného útlomu kolem 0,15 dB u jednovidových vláken. Mimo SFP moduly se využívá často v páteřních sítích. Mechanismus zapojení konektoru je stejně jako u SC konektoru zacvaknutím.

Přehled zmíněných konektorů je patrný z obrázku 3.3. Na obrázku jsou zobrazeny duální SC konektory vlevo nahoře, po pravé straně duální LC konektory a na samotném spodu FC konektory [13, 14, 15].



Obr. 3.3: Grafická ukázka často využívaných konektorů.

4 Dokumentace

V rámci navazující semestrální práce, došlo k finalizaci dokumentace již realizovaných propojů. Na propoje již realizované, navazují nově realizované propoje z místnosti SD5.67 do místnosti SD5.69. Propoj z místnosti SD5.67 do místnosti SD5.69 je realizován dvěma kabely, kdy každý kabel vede do separátního racku v místnosti SD5.69. Ze stejné optické vany v místnosti SD5.67 poté vede jeden kabel, obsahující dva 12 vláknové kabely směřující ven do šachet. V realizovaných propojích byly použity konektory dvou typů. Pro vlákna ve vnitřních propojích byly použity konektory typu SC, propoj místnost SD5.67 a venkovní šachty je poté tvořen LC konektory.

V současném stavu jsou tedy realizovány propoje z místností SD5.67 do místností SE5.116, SD5.62, SD5.59, SC5.35, SC5.52. Poté je zvlášť realizován propoj mezi laboratořmi SC5.35 a SC5.52.

4.1 Dokumentace jednotlivých propojů

Zapojení jednotlivých portů (vláken do portů) je vždy jednotné a je dodrženo ve všech propojích, v každé místnosti. Zapojení je vždy dle barvy vlákna, jelikož však byly použité i stávající vany, tak ne v každém případě se začíná od prvního portu. Zapojení do portů je vždy dle následující barevné posloupnosti: černá, oranžová, bílá, modrá, červená, šedá, hnědá, fialová, růžová, zelená, žlutá, světle modrá. Tato barevná posloupnost platí pro dvanácti vláknové kabely. Pro dvaceti čtyř vláknové kabely platí stejná posloupnost pro prvních dvanáct vláken, s tím že následujících dvanáct vláken je pro rozlišení označeno proužky. Zapojení dle zmíněné barevné posloupnost je však platné i pro tato proužkovaná vlákna, s tím rozdílem, že je u nich vždy psáno „proužkovaná“. Detailní rozbor s názornými ukázkami jsou v následujících podkapitolách, respektive v přílohách.

4.1.1 Propoj laboratoří SC5.35 a SC5.52

Propoj mezi laboratoří SC5.52 a laboratoří SC5.35 tvoří dvanáct vláken. Útlumy jednotlivých vláken jsou shrnuty v tabulce 4.1. Zapojení vany v místnosti SC5.35 je patrné ze schématu 4.1 a v místnosti SC5.52 ze schématu A.1. Kde pro propoj mezi laboratořemi byly vyhrazeny porty 25 až 36 v obou vanách.

4.1.2 Propoj místnosti SD5.67 a laboratoře SC5.52

Propoj mezi místností SD5.67 a laboratoří SC5.52 je tvořen dvaceti živými vlákny a útlum jednotlivých propojů je patrný z tabulky 4.2. Schéma zapojení jednotlivých

Tab. 4.1: Útlumy jednotlivých vláken v propoji laboratoří SC5.52->SC5.35

Vlnová délka 1310 nm			Vlnová délka 1550nm		
Pořadí	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]	Pořadí	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]
1	Černá	0,11	1	Černá	0,58
2	Oranžová	0,42	2	Oranžová	0,01
3	Bílá	0,83	3	Bílá	0,45
4	Modrá	0,92	4	Modrá	0,11
5	Červená	0,30	5	Červená	0,33
6	Šedá	0,29	6	Šedá	0,28
7	Hnědá	0,12	7	Hnědá	0,55
8	Fialová	0,35	8	Fialová	0,57
9	Růžová	3,68	9	Růžová	2,04
10	Zelená	0,32	10	Zelená	1,37
11	Žlutá	0,31	11	Žlutá	2,12
12	Světle modrá	0,35	12	Světle modrá	1,10

vláken do portů v místnosti SC5.52 je názorné z obrázku A.1 a schéma pro místnost SD5.67 je vyobrazeno ve schématu A.2, kde prvních 24 portů je vyhrazeno právě pro propoj mezi zmíněnými laboratořemi.

4.1.3 Propoj místnosti SD5.67 a laboratoře SC5.35

Propoj mezi těmito místnostmi tvoří dvanáct živých vláken, kdy v místnosti SC5.35 bylo pro tento propoj vyhrazeno prvních dvanáct portů viz 4.1 a v místnosti SD5.67 byly vyhrazeny porty 25 až 36, což je patrné z A.2. Přehled naměřených útlumů jednotlivých vláken v propoji je v tabulce 4.3.

4.1.4 Propoj místnosti SD5.67 a místnosti SD5.62

Tento propoj je tvořen dvaceti třemi živými vlákny, v místnosti SD5.62 byly vyhrazeny v optické vaně porty 5 až 28, což je názorně naznačeno ve schématu A.3. V místnosti SD5.67, poté porty 1 až 24, patrné z A.4. Naměřený útlum jednotlivých vláken v propoji ukazuje tabulka 4.4.

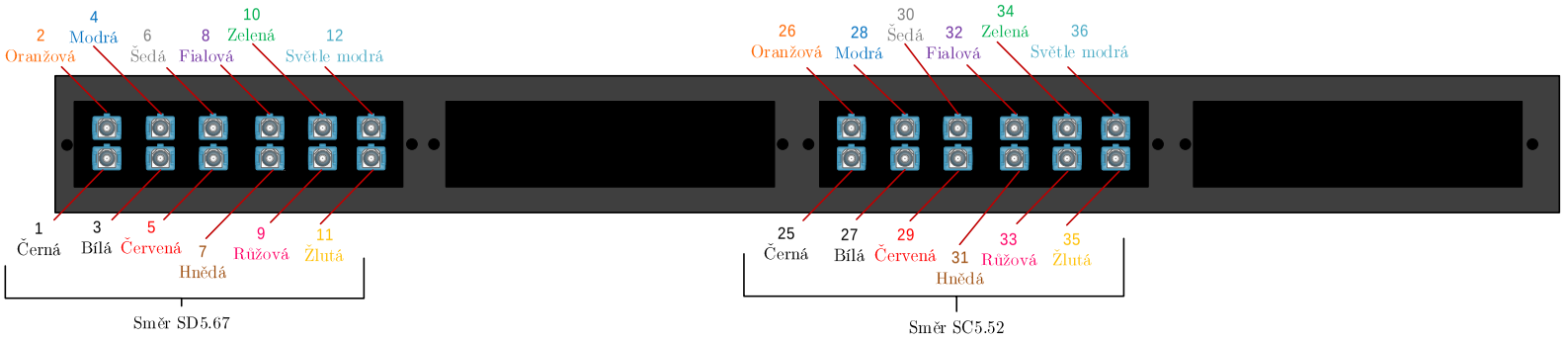
4.1.5 Propoj místnosti SD5.67 a místnosti SE5.116

Propoj těchto dvou uzlů je tvořen 12 živými vlákny, kdy útlumy jednotlivých vláken jsou zobrazeny v tabulce 4.5. Pro účely tohoto propoje byly využity porty 13 až 24 ve vaně v místnosti SD 5.67 a v místnosti SE 5.116 bylo využito portů 3 až

Tab. 4.2: Útlumy jednotlivých vláken v propoji místností SD5.67->SC5.52

Vlnová délka 1310 nm			Vlnová délka 1550nm		
Porty	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]	Porty	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]
1(S)	Černá	X	1(S)	Černá	X
2(V)	Oranžová	1,10	2(V)	Oranžová	1,59
3(S)	Bílá	0,45	3(S)	Bílá	0,86
4(V)	Modrá	0,50	4(V)	Modrá	0,85
5(S)	Červená	X	5(S)	Červená	X
6(V)	Šedá	0,22	6(V)	Šedá	0,63
7(S)	Hnědá	0,56	7(S)	Hnědá	1,19
8(V)	Fialová	0,89	8(V)	Fialová	0,93
9(S)	Růžová	0,76	9(S)	Růžová	0,93
10(V)	Zelená	18,89	10(V)	Zelená	18,33
11(S)	Žlutá	0,35	11(S)	Žlutá	0,20
12(V)	Světle modrá	0,31	12(V)	Světle modrá	0,41
13(S)	Průhledná proužk.	1,07	13(S)	Průhledná proužk.	0,90
14(V)	Oranžová proužk.	0,18	14(V)	Oranžová proužk.	0,38
15(S)	Bílá proužk.	0,44	15(S)	Bílá prouž.	0,54
16(V)	Modrá proužk.	0,36	16(V)	Modrá proužk.	0,59
17(S)	Červená proužk.	X	17(S)	Červená proužk.	X
18(V)	Šedá proužk.	0,76	18(V)	Šedá proužk.	1,17
19(S)	Hnědá proužk.	0,58	19(S)	Hnědá proužk.	0,66
20(V)	Fialová proužk.	0,26	20(V)	Fialová proužk.	0,47
21(S)	Růžová proužk.	X	21(S)	Růžová proužk.	X
22(V)	Zelená proužk.	0,33	22(V)	Zelená proužk.	0,76
23(S)	Žlutá proužk.	0,80	23(S)	Žlutá proužk.	0,78
24(V)	Světle modrá proužk.	0,58	24(V)	Světle modrá proužk.	1,13

Vana SC5.35



Obr. 4.1: Přehled zapojení portů vana SC5.35.

Směr SD5.67		
Port	Směr	Port druhá strana
1	SD5.67	25
2	SD5.67	26
3	SD5.67	27
4	SD5.67	28
5	SD5.67	29
6	SD5.67	30
7	SD5.67	31
8	SD5.67	32
9	SD5.67	33
10	SD5.67	34
11	SD5.67	35
12	SD5.67	36

Směr SC5.52		
Port	Směr	Port druhá strana
25	SC5.52	25
26	SC5.52	26
27	SC5.52	27
28	SC5.52	28
29	SC5.52	29
30	SC5.52	30
31	SC5.52	31
32	SC5.52	32
33	SC5.52	33
34	SC5.52	34
35	SC5.52	35
36	SC5.52	36

Tab. 4.3: Útlumy jednotlivých vláken v propoji místností SD5.67->SC5.35

Vlnová délka 1310 nm			Vlnová délka 1550 nm		
Porty	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]	Porty	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]
1(S)	Černá	1,26	1(S)	Černá	0,15
2(V)	Oranžová	1,69	2(V)	Oranžová	0,71
3(S)	Bílá	1,06	3(S)	Bílá	0,29
4(V)	Modrá	0,80	4(V)	Modrá	0,41
5(S)	Červená	1,04	5(S)	Červená	0,56
6(V)	Šedá	1,12	6(V)	Šedá	0,79
7(S)	Hnědá	0,65	7(S)	Hnědá	0,18
8(V)	Fialová	0,77	8(V)	Fialová	0,31
9(S)	Růžová	0,52	9(S)	Růžová	0,19
10(V)	Zelená	0,43	10(V)	Zelená	0,13
11(S)	Žlutá	0,90	11(S)	Žlutá	0,25
12(V)	Světle modrá	0,51	12(V)	Světle modrá	0,32

14. Zapojení vláken do portů v místnosti SD5.67 je zobrazeno ve schématu A.5 a v místnosti SE5.116 ve schématu A.6.

4.1.6 Propoj místnosti SD5.67 a místnosti SD5.69

V místnosti SD5.69 jsou umístěny dva separátní racky, pro každý rack byl tažen zvlášť kabel, kdy dvanácti vláknový kabel byl zaveden do racku umístěného pod stolem v levém rohu po vstupu do místnosti, zajopení viz A.8. Druhý dvaceti čtyř vláknový kabel byl zaveden do racku umístěného uprostřed místnosti na stole, zapojení je opět patrné ze schématu A.7. Z této optické vany v místnosti SD 5.67 je zároveň vytvořen propoj směrem ven z budovy do šachty. Toto zapojení v této optické vaně je zobrazeno ve schématu A.9.

V tomto propoji bylo vyhrazeno ve vaně v místnosti SD5.67 prvních dvacet čtyři portů pro rack umístěný na stole, porty 25 až 36 poté pro rack pod stolem. A poslední volné čelo bylo vyhrazeno pro propoj směrem ven a má přiřazeny porty 37 až 60.

4.2 Propoj místnosti SD5.67 a venkovních šachet

Propoj je tvořen třemi místy nejprve je tažen dvacetičtyř vláknový kabel z místnosti SD5.67 do první venkovní šachty mezi budovami T10 a T12, tato šachta je umístěna venku pod tenisovými kurty a zároveň nad parkovištěm. Druhá šachta se nachází u budovy T7, což je budova profesora Lista. Propoj mezi šachtami je tvořen čtyřicetiosmi vláknovým kabelem. Kabel do první šachty obsahuje dva menší

Tab. 4.4: Útlumy jednotlivých vláken v propoji místností SD5.67->SC5.62

Vlnová délka 1310 nm			Vlnová délka 1550 nm		
Pořadí	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]	Pořadí	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]
1(S)	Černá	0,84	1(S)	Černá	0,47
2(V)	Oranžová	0,53	2(V)	Oranžová	0,26
3(S)	Bílá	0,54	3(S)	Bílá	0,30
4(V)	Modrá	1,46	4(V)	Modrá	1,06
5(S)	Červená	0,98	5(S)	Červená	0,77
6(V)	Šedá	0,47	6(V)	Šedá	0,47
7(S)	Hnědá	1,46	7(S)	Hnědá	0,63
8(V)	Fialová	0,36	8(V)	Fialová	0,45
9(S)	Růžová	0,55	9(S)	Růžová	0,28
10(V)	Zelená	0,38	10(V)	Zelená	0,16
11(S)	Žlutá	0,36	11(S)	Žlutá	0,46
12(V)	Světle modrá	X	12(V)	Světle modrá	X
13(S)	Černá	0,18	13(S)	Černá	0,17
14(V)	Oranžová	1,15	14(V)	Oranžová	0,63
15(S)	Bílá	1,05	15(S)	Bílá	0,80
16(V)	Modrá	1,11	16(V)	Modrá	0,86
17(S)	Červená	0,73	17(S)	Červená	0,59
18(V)	Šedá	0,69	18(V)	Šedá	0,73
19(S)	Hnědá	1,10	19(S)	Hnědá	0,65
20(V)	Fialová	0,27	20(V)	Fialová	0,29
21(S)	Růžová	0,65	21(S)	Růžová	0,53
22(V)	Zelená	1,60	22(V)	Zelená	1,10
23(S)	Žlutá	0,32	23(S)	Žlutá	0,37
24(V)	Světle modrá	0,58	24(V)	Světle modrá	0,29

Tab. 4.5: Útlumy jednotlivých vláken v propoji místností SD5.67->SE.5.116

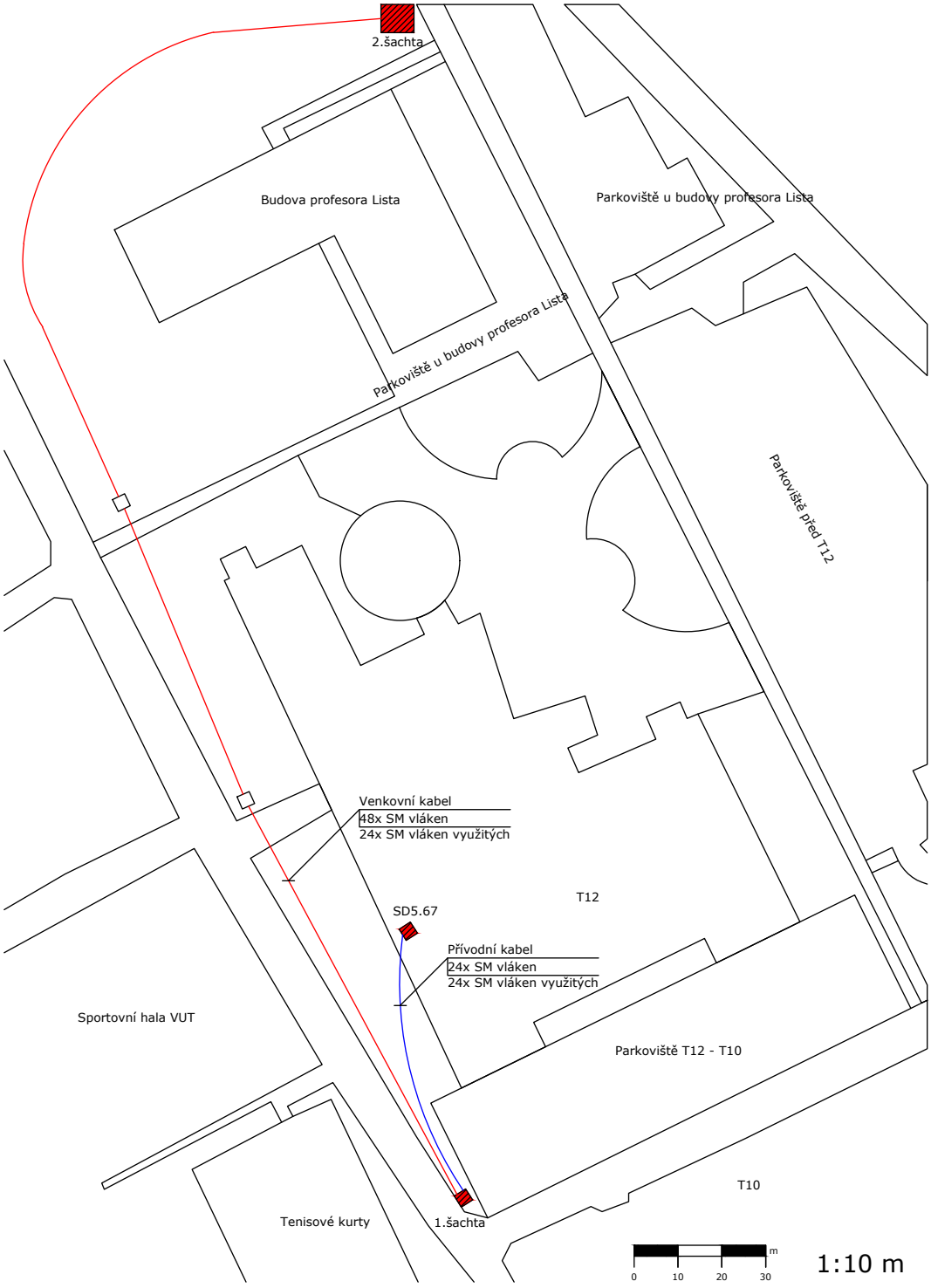
Vlnová délka 1310 nm			Vlnová délka 1550nm		
Porty	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]	Porty	Barva vlákna	Útlum vlákna [dB]
3	Černá	43,46	3	Černá	40,08
4	Oranžová	0,16	4	Oranžová	0,59
5	Bílá	3,24	5	Bílá	1,59
6	Modrá	7,42	6	Modrá	5,61
7	Červená	1,48	7	Červená	3,80
8	Šedá	1,66	8	Šedá	3,55
9	Hnědá	1,68	9	Hnědá	3,15
10	Fialová	0,85	10	Fialová	2,54
11	Růžová	1,43	11	Růžová	3,60
12	Zelená	2,02	12	Zelená	3,50
13	Žlutá	0,81	13	Žlutá	2,24
14	Světle modrá	1,08	14	Světle modrá	4,53

kabely oranžový a modrý, každý z těchto kabelů obsahuje 12 vláken. Čtyřicetiosmi vláknový kabel, který propojuje obě šachty obsahuje celkem 4 menší kabely, oranžový, modrý, zelený, hnědý, opět každý po 12 vláknech. Pro účely práce byly využity vždy oranžový a modrý kabel. Celková situace umístění jednotlivých šachet je poté zobrazena na obrázku 4.2.

4.2.1 Propoj mezi místností SD5.67 a šachtou mezi budouvou T10 a T12

Propoj v 1. šachtě, tedy propoj z místnosti SD 5.67 do venkovní šachty nacházející se u parkoviště je tvořen celkem 6 couplery a dohromady 33 sváry. Veškeré použité prvky a sváry jsou umístěny v optickém boxu, který byl uložen do šachty samotné. Optický box byl nejprve upraven, tak aby bylo možné do něj natáhnáhnou a uchytit kabely a zároveň do něj uložit couplery, zrcátka či ochrany svárů. Do boxu byly přichyceny dvě optické kazety, do kterých byly jednotlivé prvky ukládány. Box zároveň obsahuje celkem 4 záslepky pro možnost přivedení kabelu do boxu. Do dvou těchto záslepek byly navrtány díry a kabel nimi protažen. Do první záslepky přívodní dvacetičtyř vláknový kabel z místnosti SD5.67, do druhé kabel, jenž je veden do druhé šachty u budovy profesora Lista. Umístění první šachty je patrné z fotografie 4.3.

Kabely byly protaženy záslepkami naproti sobě, tak aby byla možnost svařit jednotlivá vlákna a poté je efektivně „vymotat“ do optické kazety, včetně uložení ochrany sváru do připravených zarážek v optických kazetách. Jelikož kazety byly umístěny na sobě, došlo k rozdělení prací, kdy do první kazety byly uloženy a svařeny



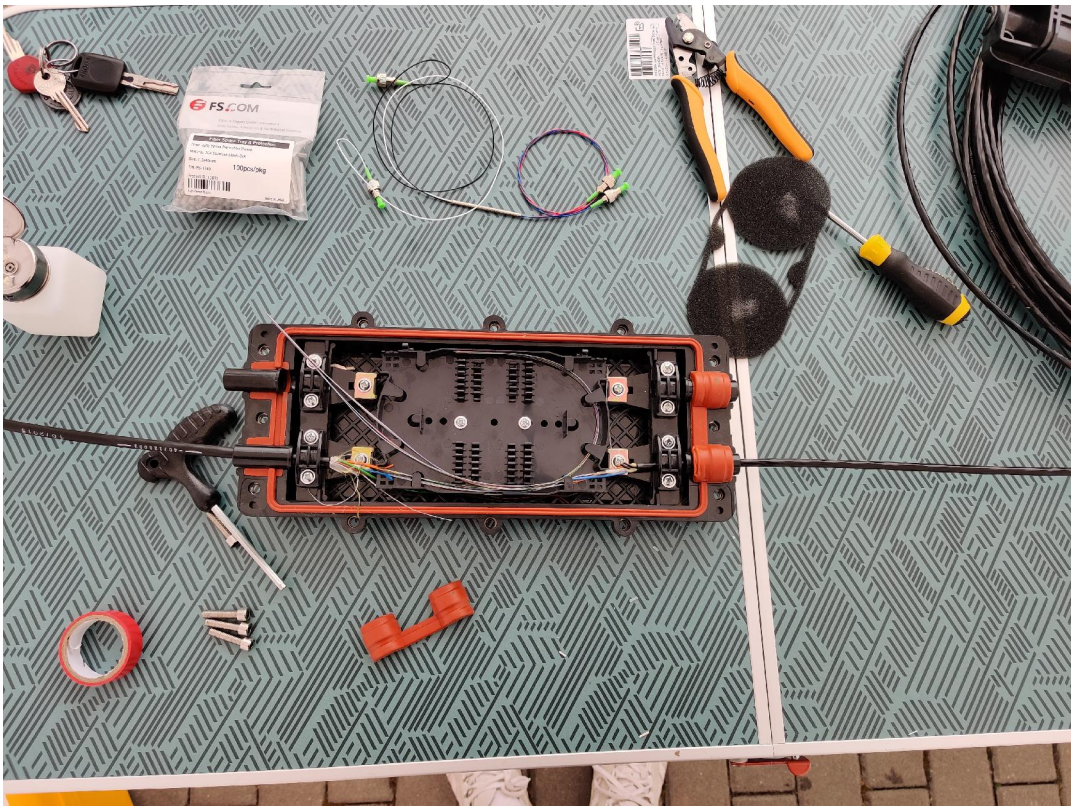
Obr. 4.2: Situace jednotlivých propojených míst.

Obr. 4.3: Fotografie zachycující umístěnía improvizované pracoviště pro kompletaci první šachty.

vlákna z modrého přívodního kabelu, dva couplery a 12 vláken z modrého kabelu vedoucího do druhé šachty u budovy T7. Dále jsou v první, tedy spodní kazetě využity další tři vlákna z oranžového kabelu vedoucího taktéž do šachty u budovy T7. Uložení první optické kazety v boxu s přivedenými a uchycenými kabely je patrné z obrázku 4.4.

Druhá kazeta obsahuje celkem 4 couplery, 12 vláken z přívodního oranžového kabelu a 9 vláken z oranžového kabelu vedoucího do šachty u budovy T7.

Modré vlákno z přívodního modrého kabelu bylo svařeno s couplerem 1×2, kdy výstupní dvě vlákna coupleru jsou svařeny s šedým, respektive oranžovým vláknem modrého kabelu vedoucího směrem do šachty T7. Fialové vlákno z přívodního modrého kabelu je poté provařeno s černým vláknem odvodního modrého kabelu. Dále byla svařena přívodní červené a černé vlákno modrého kabelu, se světle modrým respektive hnědým vláknem odvodního modrého kabelu. Hnědé a šedé vlákno přívodního kabelu bylo svařeno se vstupy coupleru 2×2, výstupy coupleru byly poté svařeny se zeleným a modrým vláknem odvodního modrého kabelu. Následně bylo svařeno postupně bílé, růžové, oranžové, žluté, zelené vlákno přívodního modrého

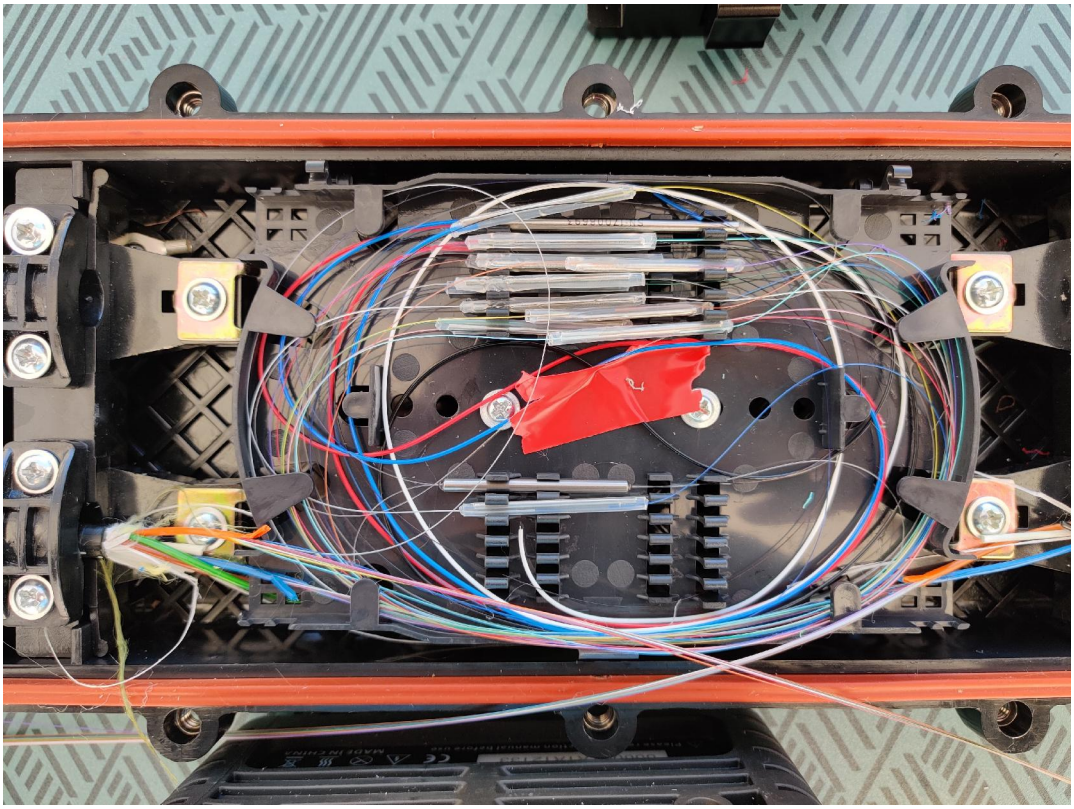


Obr. 4.4: Fotografie zachycující přivedené kabely do optického boxu.

kabelu s bílým, červeným, fialovým, oranžovým, růžovým vláknem, přesně v tomto pořadí. Tyto vlákna jsou součástí modrého kabelu vedoucího do šachty u budovy T7. Výše zmíněná vlákna jsou umístěna ve spodní kazetě. Poslední čtyři vlákna umístěna v této kazetě jsou vlákna šedé a modré, avšak již oranžového odvodního kabelu, tyto vlákna byla provařena mezi sebou a poslední světle modré vlákno přívodního modrého kabelu, které bylo provařeno se světle modrým vláknem oranžového kabelu veducího do druhé šachty.

Druhá kazeta obshahuje svár modrého vlákna přívodního již oranžového kabelu se vstupním vláknem coupleru 1×2, výstupy coupleru byly dále svařeny se zeleným, respektive hnědým vláknem oranžového kabelu vedoucího ke druhé šachtě. Další dvě vlákna přívodního oranžového kabelu, konkrétně fialové vlákno a červené byly provařeny se vstupními vlákny coupleru 2×1 a výstup coupleru byl svařen s černým vláknem vstupního oranžového kabelu. Následně došlo ke svaření hnědého a šedého vlákna mezi sebou, obě tyto vlákna jsou součástí oranžového přívodního kabelu. Bílé vlákno přívodního oranžového kabelu bylo svařeno s couplerem 2×1, kdy druhý vstup coupleru byl svařen s výstupem dalšího coupleru 2×2 a výstup coupleru 2×1 do kterého je přivedeno bílé vlákno, je provařen se žlutým vlák-

nem oranžového kabelu směřujícího k šachtě u budovy T7. Vstupy coupleru 2×2, jsou poté provařeny s růžovým a oranžovým vláknem přívodního oranžového kabelu a poslední volný výstup coupleru s oranžovým vláknem oranžového kabelu, který vede to druhé šachty. Posledními provařenými vlkákny byly vlákna žluté, zelené a světle modré přívodního oranžového kabelu s fialovým, bílím a červeným vláknem oranžového kabelu směřujícího k budově T7. Růžové vlákno oranžového odvodního kabelu, zůstává navolno neprovařeno. Černé vlákno taktéž oranžového odvodního kabelu zůstává jako rezerva. Níže je přiložen obrázek z průběhu prací 4.5.



Obr. 4.5: Fotografie zachycující práce v optickém boxu.

4.2.2 Vzájemný propoj mez šachtami

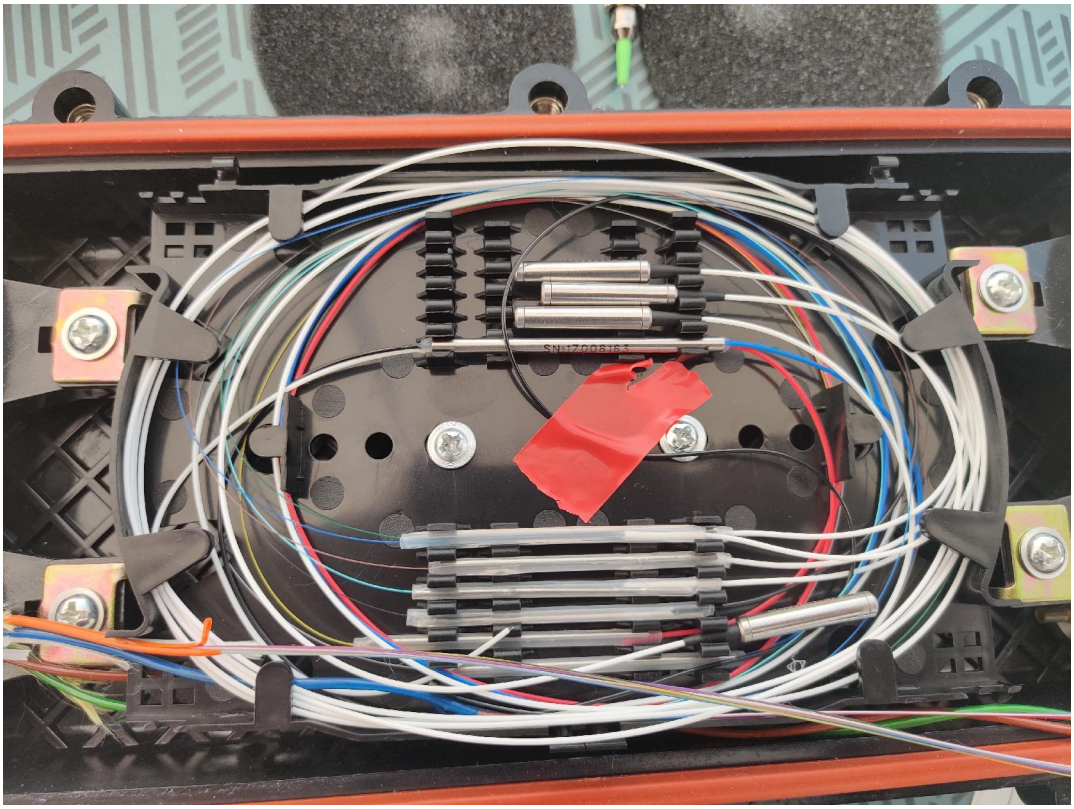
Propoj mezi šachtami je tvořen celkem 48 vlákny, z nichž bylo využito 24, respektive 23 vláken. Propoj je ukončen v optickém boxu, který je uložen v šachtě u budovy T7. Umístění šachty v zemi je zobrazeno na fotografii 4.6. V tomto optickém boxu se nachází 3 couplery, 5 zrcátek a celkem bylo vyvařeno 18 svárů.

Optický box disponuje jedním kabelem, který obsahuje 4 menší kabely, ve kterých jsou umístěna jednotlivá vlákna. Pro realizaci daného zapojení bylo využito modrého a oranžového kabelu, zelený a hnědý kabel zůstaly ponechány jako rezervní pro

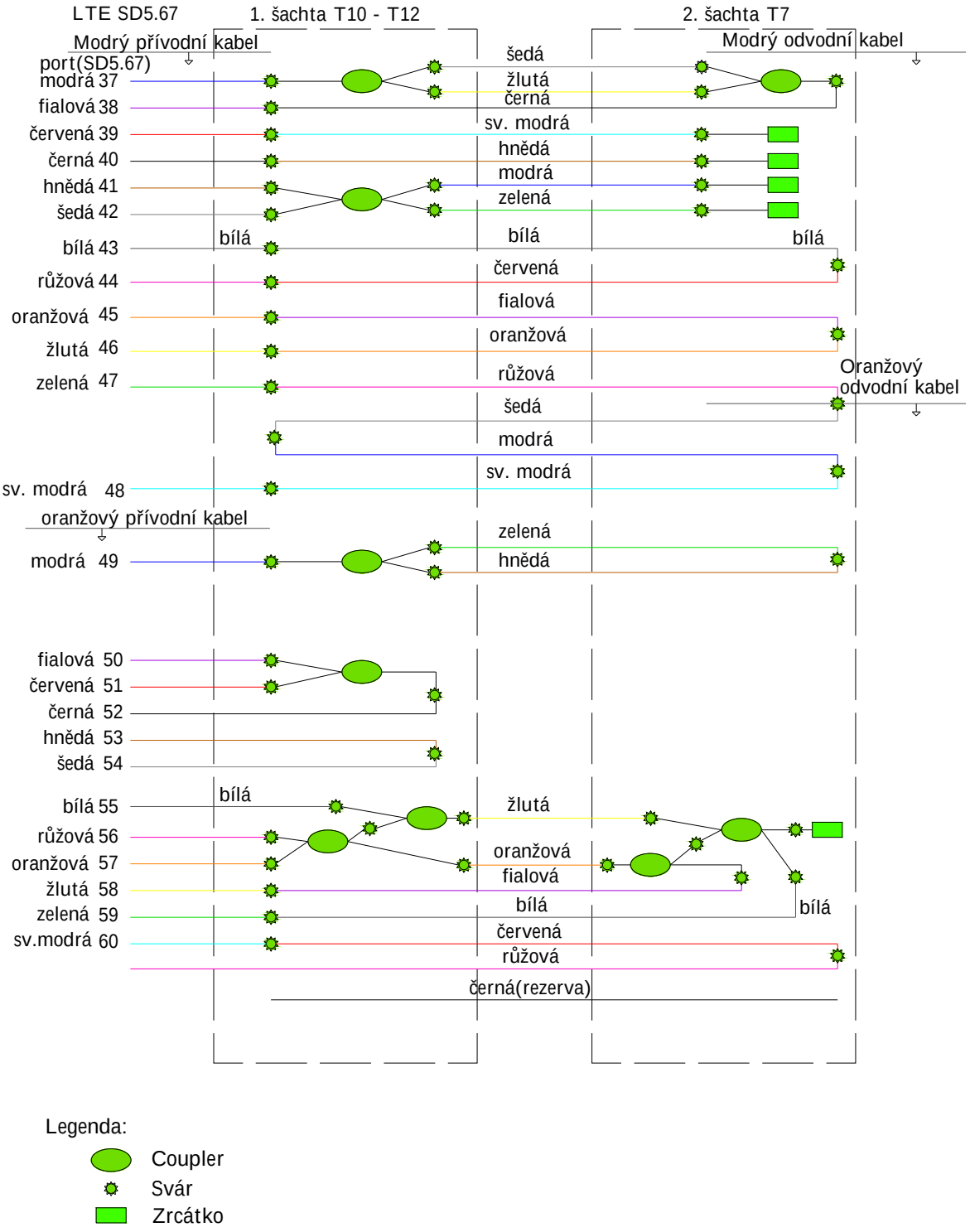
Obr. 4.6: Fotografie umístění druhé šachty u budovy T7.

případné budoucí rozšíření. Nejprve bylo využito prvních 12 vláken modrého kabelu, kdy šedé vlákno a žluté vlákno bylo svařeno couplerem 2×1 a výstup coupleru poté svařen s černým vláknem. Světle modré, hnědé, zelené a modré vlákno bylo svařeno vždy s jedním zrcátkem. Bílé vlákno bylo svařeno s vláknem červeným. Stejně tak bylo svařeno fialové vlákno s vláknem oranžovým. Vlákno růžové je vlákno poslední z modrého kabelu, toto vlákno bylo svařeno s vláknem šedým, již však oranžového kabelu. Pro další realizaci daného zapojení byla tedy využita zbylá vlákna z oranžového kabelu. Modré vlákno bylo svařeno s vláknem světle modrým a vlákno zelené s vláknem hnědým. Žluté vlákno poté bylo svařeno s prvním vstupem coupleru a druhý vstup coupleru byl svařen s prvním výstupem druhého coupleru. Na první výstup prvního coupleru bylo poté přivařeno zrcátko a druhý výstup byl svařen s vláknem bílým. Na vstup druhého coupleru bylo přivařeno oranžové vlákno a zbývající výstupní vlákno coupleru bylo svařeno s vláknem fialovým. Posledními využitými vlákny byla vlákna růžové a červené, která byla vzájemně svařena. Z oražového kabelu bylo využito tedy 11 vláken, poslední černé vlákno nebylo využito. Na fotografii 4.7 je zobrazena práce ve druhé šachtě. Výše popsané zapojené je zobrazeno v kompletním schématu zapojení, které je patrné z obrázku 4.8. Veškeré fotografie

z práce jsou poté zobrazeny v příloze B.



Obr. 4.7: Fotografie průběhu prací v druhé šachtě u budovy T7.



Obr. 4.8: Schéma zapojení propojů.

5 Měření a příprava optických vláken

V rámci práce došlo k přípravě a měření různě dlouhých optických vláken navinutých na cívky (cívky), keré budou sloužit i pro simulaci různě dlouhých vzdáleností v navržené rackové skříni, ta je popsána v následující kapitole.

Většina cívek nebyla okonektorovaná, prvním úkonem tedy bylo navaření pigtailů na oba konce vláken. Pigtaily byly s konektorem typu SC a broušením APC, tedy broušením pod úhlem. Cívky, které již obsahovaly navařené konektory, byly zrevidovány a v některých případech nanovo překonektorovány skrze nález přerušení či zcvaknutí vlákna. Celkem tedy došlo k revizi dvaceti cívek a bylo provedeno osmnáct svárů. Odhadované vložné útlumy svárů svářečkou se nepřevyšovaly 0,01 dB. Přehled odhadovaných vložných útlumů je patrný z tabulky 5.1.

Tab. 5.1: Přehled odhadovaných vložných útlumů sváru svářečkou

Popis cívky	Odhadovaný vložný útlum sváru [dB]	
	Prvního sváru	Druhého sváru
184173	0,01	0
modrá neoznač.	0,01	0,01
153280	x	x
184176	0,01	0
184174	0,01	0,01
153281	x	x
152236	0,01	x
153283	x	x
184179	0,01	0,01
184175	0,01	0,01
153284	0,01	x
184177	0,01	0
153285	0,01	x
šedá G.653	x	x
červená 20 km	x	x
červená 10 km	x	x
15189	0,01	x
oranžová G.655	x	x
červená 5 km	x	x
červená 50 km	x	x
Pozn.: x značí již okentorovanou cívku		

Po kompletním okonektorování a následné kontrole cívek došlo na měření cívek

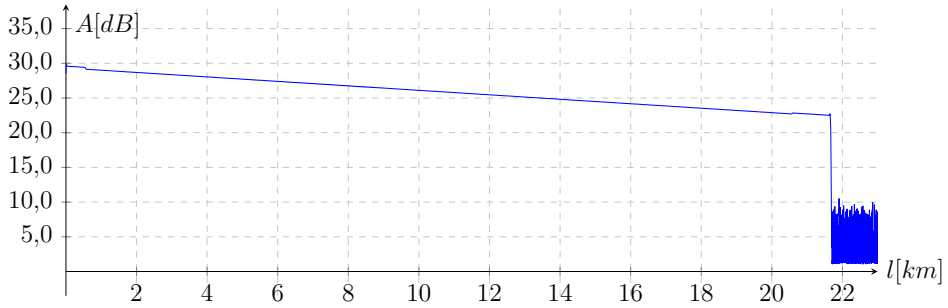
dvěmi metodami reflektometrickou a přímou metodou. Pomocí reflektometru byly mimo celkové a měrné útlumy navinutých vláken stanovoveny celkové délky. Celkové útlumy byly poté ověřeny měřením přímou metodou. Při měření reflektometrem bylo použito, jak předřadné vlákno o délce 500 metrů dle údajů od výrobce, tak zařadné vlákno o délce 1 km, dle údajů výrobce. Avšak měřením reflektometrem byla stanovena délka předřadného vlákna 533 m. Předřadné vlákno bylo použito z důvodů eliminace mrtvé zóny a co možná největšímu potlačení Fresnelova odrazu na prvním konektoru.

Celkové délky navinutých optických vláken na špulkách byly stanoveny odečtením z vykresleného grafu reflektometrem a to vždy ze vzdálenosti detekce odrazu na spojce mezi druhým koncem cívky a zařadným vláknem a následným odečtením předřadného vlákna. Měření probíhalo vždy pro dvě vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. Tabulka obsahující vypočtené délky navinutých optických cívek a naměřené celkové útlumy přímou i reflektometrickou metodou jsou patrné z tabulky 5.2 Jednotlivé

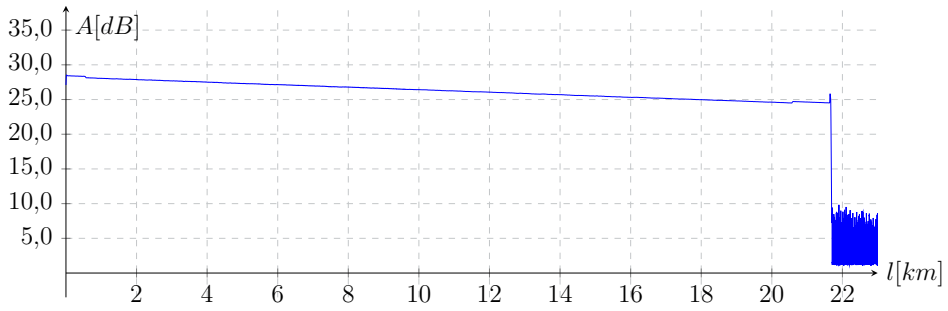
Tab. 5.2: Přehled naměřených celkových útlumů a výsledných odečtených vzdáleností.

Popis cívky	Naměřený útlum [dB]				Naměřená vzdálenost [m]
	Přímou metodou		Reflektometrem		
	1310 nm	1550 nm	1310 nm	1550 nm	
184173	7, 97	4, 3	7, 091	3, 915	20028
Modrá neoznač.	2, 63	1, 63	2, 49	1, 36	5361
153280	2	1, 2	2, 206	1, 115	5220
184176	0, 91	0, 71	1, 645	0, 964	2014
184174	1, 91	1, 3	2, 568	1, 461	5026
153281	0, 9	1, 62	1, 973	0, 984	5081
152236	3, 97	2, 549	3, 951	2, 168	10558
153283	3, 06	1, 7	3, 414	1, 756	10105
184179	0, 62	0, 45	1, 342	1, 054	1013
184175	1, 56	0, 88	2, 097	1, 088	4978
153284	2, 13	2, 42	3, 560	1, 877	10072
184177	1, 01	0, 12	1, 762	1, 087	2016
153285	7, 26	4, 3	7, 293	4, 780	20076
šedá G.653	5, 01	2, 47	4, 964	2, 716	7125
červená 20 km	6, 6	3, 8	7, 014	3, 855	19985
červená 10 km	3, 68	2, 39	3, 995	2, 343	9969
15189	6, 97	4, 08	7, 517	4, 243	21122
oranžová G.655	5, 28	3, 18	4, 982	2, 847	10342
červená 5 km	2, 33	1, 45	2, 198	1, 213	4982
červená 50 km	19, 079	11, 36	20, 190	11, 981	50400

náměry cívek byly exportovány do .sor a .trc souborů a následně byl vytvořen report z měření. Tyto .sor soubory byly převedeny do standartních csv souborů, ze kterých následně došlo k vygenerování celkem 40 grafů, dva grafy pro každou cívku jeden pro měření na vlnové délce 1310 nm a druhý pro 1550 nm. Níže jsou zobrazeny vykreslené grafy z naměřených hodnot reflektometrem. Graf 5.1 zobrazuje průběh pulzu o vlnové délce 1310 nm cívkou s označením 184173. Druhý vykreslený graf 5.2 zobrazuje průběh pulzu stejnou cívkou, s tím rozdílem, že vlnová délka byla pro měření nastavena na 1550 nm.



Obr. 5.1: Graf měření reflektometrickou metodou špulky 184173 pro vlnovou délku 1310 nm.

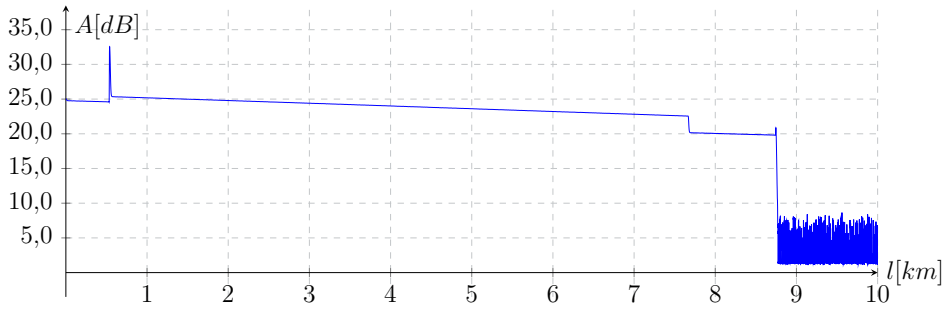


Obr. 5.2: Graf měření reflektometrickou metodou špulky 184173 pro vlnovou délku 1550 nm.

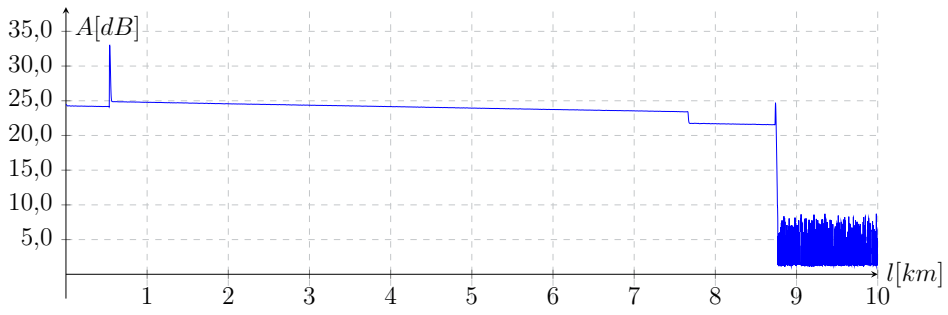
Při porovnání těchto dvou grafů lze spatřit, že při měření na vlnové délce 1310 nm je celkový naměřený útlum trasy vyšší, než při měření na vlnové délce 1550 nm. Z toho plyne poznatek, že poloměr ohybu vlákna při navíjení na cívku je dostatečný a nedochází tak k příliš velkému nežádoucímu úniku paprsku z vlákna, jelikož vlnová délka 1550 nm je obecně citlivější na ohyby než vlnová délka 1310 nm. Z grafu je taktéž patrná délka vlákna navinutého na cívce, kdy celková měřeného vlákna měla

i s předřadným a zařadným vláknem 21637 metrů. Reflektometrickou metodou byla detekována spojka vlákna se zařadným vláknem ve vzdálenosti 25567 m a spojka předřadného vlákna s počátkem vlákna na cívce ve vzdálenosti 539 metrů. Odečtením těchto dvou hodnot poté byla stanovena délka navinutého vlákna na cívce na 20028 m. Obdobným způsobem poté došlo ke stanovení délky veškerých vláken na cívkách. Po měření refletometrickou metodou došlo na ověření celkového útlumu signálu při průchodu vláknem i zmíněnou přímou metodou a srovnání s reflektometrickou metodou. Při pohledu do tabulky 5.2. Z této tabulky je patrné, že rozdíly těchto dvou metod jsou nepatrné. Tyto rozdíly mohly také vzniknout rozdílným čištěním konektorů a rozdílnými referencemi při měření přímou metodou.

Přiloženy jsou i další grafy pro zobrazení detekce vad na trase, kdy zde je možno spatřit za předřadným vláknem zpětný odraz a tudíž nárůst ztráty optického výkonu. Tato ztráta může být způsobena například ohybem pigtailu, špatným svárem, špatným čištěním konektorů či špatnou spojkou. Grafy jsou možné spatřit na obrázcích 5.3 a 5.4. Z grafů je patrné, že měření na obou vlnových délkách došlo k detekci vady na trase, které způsobují nežádoucí ztráty optického výkonu.



Obr. 5.3: Graf měření reflektometrickou metodou šedé špulky s vláknem G.653 pro vlnovou délku 1310 nm.



Obr. 5.4: Graf měření reflektometrickou metodou šedé špulky s vláknem G.653 pro vlnovou délku 1550 nm.

6 Racková sříň

V rámci práce došlo k navržení rackové skříně, pro simulaci různě dlouhých optických tras. Návrh byl proveden v programu Fusion 360 (Informace k samotnému programu k náhledu [16].). Samotný návrh rackové skříně prošel celkem 7 různými variantami, kdy původní navrh byl pro tři různé typy optických cívek. V průběhu konzultací a hledání optimálního řešení došlo ke stanovení, že výsledná racková skříň bude pro celkem 4 optické cívky, avšak jednoho typu. Každá z těchto předchozích 6 variant měla jiný způsob fixace cívky, v závislosti na složitosti výroby a montáže uchopení bylo stanoveno nejvhodnější řešení, které bude realizováno.

6.1 Dokumentace rackové skříně

Výsledné řešení skříně je tedy ve velikosti 6U (Rack Unit), kde racková jednotka určuje výšku řešení. Jedna racková jednotka odpovídá 1,75 palce, což je v přepočtu 4,445 cm. Toto řešení je dostatečně velké pro uložení všech 4 cívek do skříně a zároveň při přesné výrobě poskytuje možnost cívky fixovat vůči pohybu. Celý návrh byl nakreslen a navržen dle normy EIA-310 (Náhled části normy k zobrazení [17].), která definuje potřebné rozměry pro uchycení skříně do 19 palcových racků. Při návrhu došlo k ověření, že racky, pro které je skríň určená mají patřičné rozměry a odpovídají normě, kdy norma definuje minimální mezeru mezi lištami racku 450 mm, což veškeré měřené racky na ústavu telekomunikací splňují. V příloze C jsou přiloženy fotografie daného typu cívky, pro které je racková skříň určena a šířky optické vany. Průměr cívky byl naměřen 233 mm a šířka cívky 106,7 mm. Dále byly změřeny ornamenty na boční straně cívky, pomocí kterých bude cívka uchycena více viz zmíněná příloha.

Velikost skříně byla navržena dle zmíněné normy, kdy zmíněná délka mezi lištami racku nesmí být menší než 450 mm. Racková skříň má tedy rozeměry na délku 449 mm pro pohodlné umístění do racku. Tato norma dále definuje délku předního panelu ta je pro 19 palcový rack stanovena na 482,6 mm, což je zároveň délka celého předního panelu rackové skříně. Normá definuje vzdálenosti úchopových děr do racku, definovány jsou jak vzájemné vertikální vzdálenosti mezi dírami jedné strany, tak vzájemné horizontální vzdálenosti mezi dírami. 1U velikost obsahuje tři díry pro uchopení do racku. 1U vzdálenost mezi těmito dírami je 0,625 palců, tedy 15,9022 mm. Vzdálenost mezi další dírou následující U jednotky tedy 2U je 0,5 palce tedy 12,7 mm. Vzájemná horizontální vzdálenst mezi dírami pravého úchopu a levého úchopu je poté normou definována na 465 mm. Dle těchto definovaných rozměrů byly navrženy úchopové díry rackové skříně. Celkové rozměry skříně jsou tedy s úchopy 482,6 mm na délku, 266,7 mm na výšku a 360 mm na délku, poslední zmíněný rozměr byl stanoven dle měření používané optické vany. Tyto rozměry tvoří

hlavní konstrukci rackové skříně. Celkový render skříně je zobrazen na fotografie 6.1.

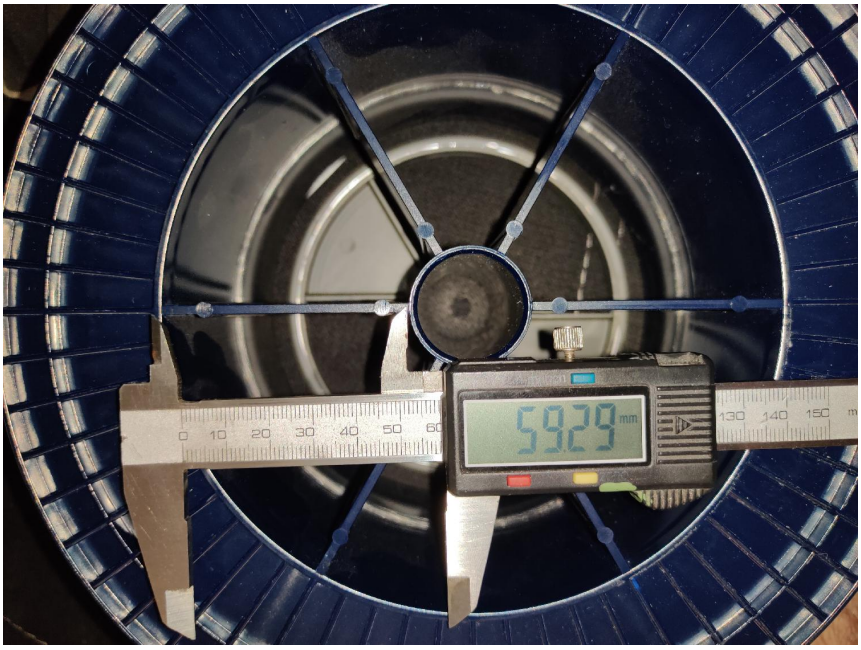
Obr. 6.1: Zobrazení celkového renderu skříně.

Spodní část čela je neodenímatelná a je součástí dna skříně, do této části budou vyřezány otvory pro montáž duálních adaptérů pro optické konektory. Pevné spodní čelo má na délku 446 mm a na výšku 21 mm. 21 mm z důvodů, že vnitřnek skříně obsahuje prázdné dno, které je přichyceno na silentblocích. Silent bloky jsou o výšce 20 mm a samotné prázdné dno je o tloušťce 1 mm. Celá tato hlavní konstrukce je z oceli o tloušťce 1,5 mm. Prázdné dno, které bude uchyceno na silentblocích má rozměry 444 mm na délku a 286 mm na šířku. Toto prázdné dno má vyvrtané díry pro M6 závit silentbloků a zároveň díry pro M4 závit pro připevnění slotů právě ke dnu. Dno na silentblocích má tloušťku 1 mm a součástí jsou „kolíčky“, které zabraňují bočnímu a hornímu pohybu slotů. Render prázdného dna je možné spatřit na obrázku 6.2.

Cívky, na kterých jsou vlákna navinuta obsahují „žebrování“ s ornamenty po bočních stranách viz obrázek 6.3. Tyto ornamenty byly změřeny a dle nich navrženo uchopení na levé boční stěně slotů. Tyto sloty jsou zobrazeny na obrázku 6.4. Sloty jsou opět z oceli o tloušťce jednoho milimetru, dno slotů obsahuje díry pro M4 šroub sloužící k uchycení slotů do prázdného dna a výřez na zajetí celé této konstrukce do připravených kolíčků taktéž v prázdném dně.

O výrobu se stará firma EMKO Case a.s., která se zabývá výrobou IT skříní. Odhadované nacenění této skříně firmou je do 5000 kč bez DPH. Ukázka dokumentace je zobrazena v příloze D a je vypálena na CD.

Obr. 6.2: Zobrazení renderu prázdného dna.



Obr. 6.3: Fotografie bočních ornamentů cívky.

Obr. 6.4: Zobrazení renderu prvku pro uchycení cívky.

Závěr

Práce obsahuje kompletní návrh 3D modelu rackové skříně v programu Fusion 360. Racková skříň byla navžena dle normy EIA-310, které vyhovují racky používané na ústavu telekomunikací. Výsledná skříň je v řešení 6U. Toto řešení umožňuje umístit až 4 optické cívky do této skříně a poskytuje tak možnost simulace různě dlouhých tras. Vnitřek skříňě byl navržen tak, aby tyto cívky byly pevně uchyceny a nedošlo k jejich nežádoucímu pohybu uvnitř skříně. Pro toto uchycení byly navrženy sloty o tloušťce 1 mm, na jejichž levou boční stěnu budou frézováním vyrobeny na míru ornamenty, pomocí kterých dojde k úchopu. Skříň obsahuje prázdné dno, které bude na distančních sloupcích a umožňuje uchycení těchto slotů.

Skříň umožňuje uložení až 4 cívek s optickými vlákny, jednotlivá optická vlákna, která mohou být vložena do rackové skříně byla proměřene reflektometrickou metodou a přímou metodou, na základě naměřených dat byly zpracovány tabulky s naměřenými daty a pro veškerá vlákna zpracovány grafy. Kompletní data a grafy jsou součástí odevzdaných souborů.

Práce obsahuje také kompletní finalizaci dokumentace realizované části vnitřního polygonu a zároveň dokumentaci venkovní části polygonu. Došlo tedy k doplnění nově realizovaných propojů z místnosti SD5.67 do místnosti SD5.69. kdy tento propoj je tvořen dvěma kabely, první kabel vedený do racku umístěného pod stolem v místností SD5.69 obsahuje 12 vláken a druhý kabel vedený do racku umístěného na stole v totožné místnosti obsahuje 23 vláken. Další částí je poté samotná realizace venkovního polygonu, který je tvořen propojem mezi dvěmi šachtami a následným propojem opět zpět do místnosti SD5.67. Propoj místnosti SD5.67 a první šachty je již realizován a zapojení v optické vaně je zdokumentováno. Tento propoj je tvořen 24 vlákny. Následný propoj mezi šachtami bude tvořen taktéž 24 vlákny, avšak venkovní kabel obsahuje 48 vláken, pro případné rozšíření.

Práce obsahuje přílohy, kde jsou vyobrazeny jednotlivá schémata zapojení, fotografie zachycující měření reálných parametrů prvků sloužících pro návrh rackové skříně a samotný návrh rackové skříně.

Literatura

[1] KEISER, Gerd. *Optical fiber communications* [online]. 4th ed. New York USA: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-338071-1.

[2] RAMASWAMI, R., K.N. SIVARAJAN a G.H. SASAKI. *Optical Networks.* [online]. Elsevier, 2010. ISBN 9780123740922. Dostupné z: doi:10.1016/C2009-0-17339-7

[3] FILKA, Miloslav, 2017. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku.* Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol. ISBN 978-80-86785-29-5.

[4] DUTTON, Harry *Understanding Optical Communications* USA: IBM, Září 1998. SG24-5230-00.

[5] AGRAWAL G., *Fiber Optic Communication Systems, Wiley series in microwave and optical engineering*. Rochester, New York, John Wiley & Sons, Inc, 2010, ISBN 978-0-470-50511-3

[6] KOIKE, Yasuhiro *Fundamentals of Plastic Optical Fibers*. Weinheim Německo: WILEY-VCH, 2015. ISBN 978-3-527-64653-1.

[7] YOUNG, Matt *Optics and lasers: including fibers and optical waveguides*, páte, kompletně zrevidované vydání. Springer, 2000. ISBN 354065741X,9783540657415.

[8] VIVEK Alwayn, *Optical network design and implementation.* , Cisco Press,2004, ISBN 1587051052,9781587051050

[9] BUBENÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. Brno: Code Creator, 2015 [cit. 2020-10-21]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z URL:
<https://publi.cz/books/185/Cover.html>.

[10] YABLON, Andrew D. *Optical fiber fusion splicing*. New York: Springer, 2005. ISBN 3-540-23104-8.

[11] LUCKI, Michal. Fiber Optic Connectors. *Nové trendy v elektronických komunikacích Optické systémy a sítě* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 40f [cit. 2020-12-08]. Dostupné z URL:
<https://publi.cz/books/241/Impresum.html>.

[12] LU, Lidong, Yuejiang SONG, Xuping ZHANG a Fan ZHU. Frequency division multiplexing OTDR with fast signal processing. *Optics and laser technology* [online]. Elsevier, 2012, 44(7), 2206-2209 [cit. 2021-5-17]. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2012.02.037

[13] Fiber Optic Connectors. *Optical Fiber Articles about LightTransmission for Video, Audio, Data using Analog Digital L-Band HDTV 1080 and more - Fiber-Optics.info* [online]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z URL: <http://www.fiber-optics.info/articles/fiber_optic_connectors>.

[14] BOUŠKA, Petr. *Konektory a Transceivery pro sítě LAN a SAN* [online]. In: . 2017, 18.04.2017 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z URL: <https://www.samuraj-cz.com/clanek/konektory-a-transceivery-pro-site-lan-a-san/>.

[15] JAROŠ, P. *Optické spoje a jejich vliv na přenos.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Tejkal.

[16] Fusion 360 Help | Getting started with Fusion 360.*Autodesk | 3D Design, Engineering & Construction Software* [online].[cit. 2020-12-06]. Dostupné z URL: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-1C665B4D-7BF7-4FDF-98B0-AA7EE12B5AC2>.

[17] Define: EIA-310 [online], 2007. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z URL: <https://www.server-racks.com/eia-310.html>.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

FTTx	Vlákno zavedeno do . . . – Fiber To The . . .
LED	Elektroluminesčenční dioda – Light Emitting Diode
ITU	Mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunications Union
EDFA	Eribiem dopovananý vláknový zesilovač – Eribium Doped Fiber Amplifier
NZDSF	Vlákno s nenulovou posunutou disperzí – Non-Zero Dispersion-Shifted Fibe
OTDR	Optický reflektometr – Optical Time Domain Reflectomete
DSP	Digitální Signálový procesor
Flat PC	Rovinný kontakt – Flat Physical Contact
PC	Středový kontakt – Physical Contact
APC	Úhlové broušení – Angled Physical Contact
SC	SC konektor – Standard či Subscriber Connector
FC	FC konektor – Fiber Connector
CATV	Kabelová televize – Community Antenna Television
LC	LC konektor – Little Connector
SFP	SFP modul – Small Form-factor Pluggable
CPU	Centrální procesorová jednotka – Central Processing Unit
RU	Racková jednotka – Rack Unit

Seznam příloh

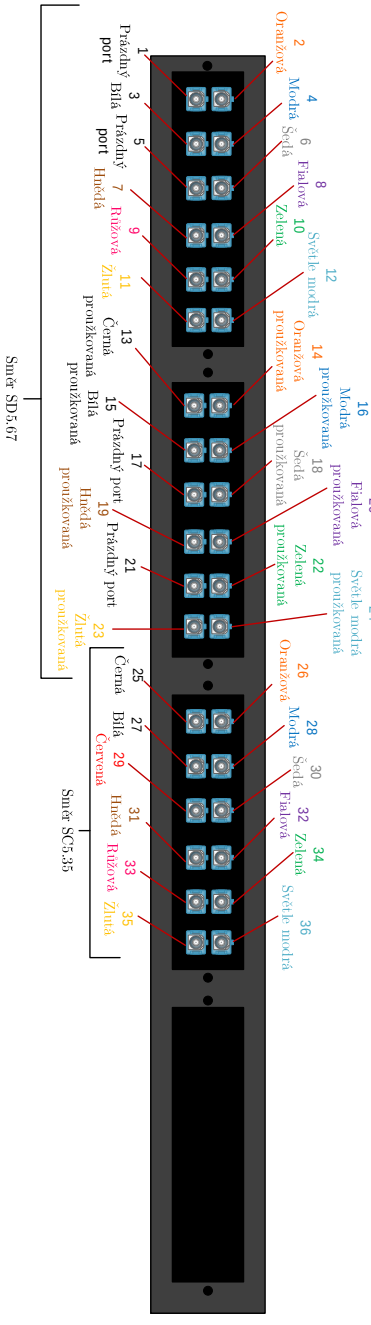
A Schémata zapojení optických van **69**

B Fotografie průběhu prací na polygonu **79**

C Fotografie měřených parametrů cívky a vany **83**

D Parametry jednotlivých komponentů rackové skříně **85**

A Schémata zapojení optických van



Směr SD5.67		
Port	Směr	Port druhá strana
1	X	X
2	SD5.67	2
3	SD5.67	3
4	SD5.67	4
5	X	X
6	SD5.67	6
7	SD5.67	7
8	SD5.67	8
9	SD5.67	9
10	SD5.67	10
11	SD5.67	11
12	SD5.67	12

Směr SD5.67		
Port	Směr	Port druhá strana
13	SD5.67	13
14	SD5.67	14
15	SD5.67	15
16	SD5.67	16
17	X	X
18	SD5.67	18
19	SD5.67	19
20	SD5.67	20
21	X	X
22	SD5.67	22
23	SD5.67	23
24	SD5.67	24

Směr SC5.35		
Port	Směr	Port druhá strana
25	SC5.35	25
26	SC5.35	26
27	SC5.35	27
28	SC5.35	28
29	SC5.35	29
30	SC5.35	30
31	SC5.35	31
32	SC5.35	32
33	SC5.35	33
34	SC5.35	34
35	SC5.35	35
36	SC5.35	36

Obr. A.1: Přehled zapojení portů vana SC5.52.

Směr SC5.52		
Port	Směr	Port druhá strana
1	X	X
2	SC5.52	2
3	SC5.52	3
4	SD5.67	4
5	X	X
6	SC5.52	6
7	SC5.52	7
8	SC5.52	8
9	SC5.52	9
10	SC5.52	10
11	SC5.52	11
12	SC5.52	12

Směr SC5.52		
Port	Směr	Port druhá strana
13	SC5.52	13
14	SC5.52	14
15	SC5.52	15
16	SC5.52	16
17	X	X
18	SC5.52	18
19	SC5.52	19
20	SC5.52	20
21	X	X
22	SC5.52	22
23	SC5.52	23
24	SC5.52	24

Směr SC5.35		
Port	Směr	Port druhá strana
25	SC5.35	1
26	SC5.35	2
27	SC5.35	3
28	SC5.35	4
29	SC5.35	5
30	SC5.35	6
31	SC5.35	7
32	SC5.35	8
33	SC5.35	9
34	SC5.35	10
35	SC5.35	11
36	SC5.35	12

Obr. A.2: Přehled zapojení portů vana SD5.67 směr budova SC.

Směr SD5.67		
Port	Směr	Port druhá strana
1	X	X
2	X	X
3	X	X
4	X	X
5	SD5.67	1
6	SD5.67	2
7	SD5.67	3
8	SD5.67	4
9	SD5.67	5
10	SD5.67	6
11	SD5.67	7
12	SD5.67	8

Směr SD5.67		
Port	Směr	Port druhá strana
13	SD5.67	9
14	SD5.67	10
15	SD5.67	11
16	X	X
17	SD5.67	13
18	SD5.67	14
19	SD5.67	15
20	SD5.67	16
21	SD5.67	17
22	SD5.67	18
23	SD5.67	19
24	SD5.67	20

Směr SD5.67		
Port	Směr	Port druhá strana
25	SD5.67	21
26	SD5.67	22
27	SD5.67	23
28	SD5.67	24

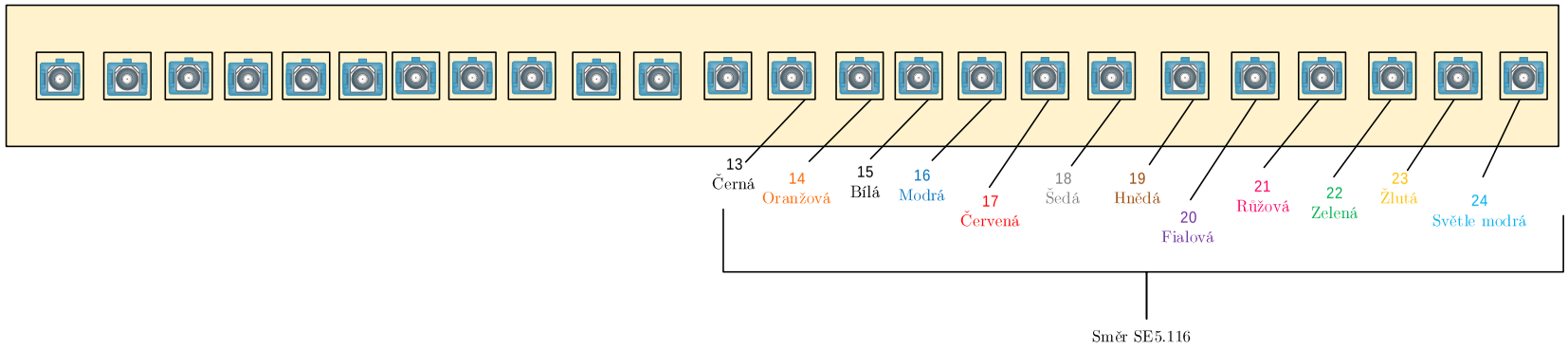
Obr. A.3: Přehled zapojení portů vana SD5.62.

Směr SD5.62		
Port	Směr	Port druhá strana
1	SD5.62	5
2	SD5.62	6
3	SD5.62	7
4	SD5.62	8
5	SD5.62	9
6	SD5.62	10
7	SD5.62	11
8	SD5.62	12
9	SD5.62	13
10	SD5.62	14
11	SD5.62	15
12	X	X

Směr SD5.62		
Port	Směr	Port druhá strana
13	SD5.62	17
14	SD5.62	18
15	SD5.62	19
16	SD5.62	20
17	SD5.62	21
18	SD5.62	22
19	SD5.62	23
20	SD5.62	24
21	SD5.62	25
22	SD5.62	26
23	SD5.62	27
24	SD5.62	28

Obr. A.4: Přehled zapojení portů vana SD5.67 směr SD5.62.

Vana SD5.67 směr SE5.116



Směr SE5.116		
Port	Směr	Port druhá strana
13	SE5.116	3
14	SE5.116	4
15	SE5.116	5
16	SE5.116	6
17	SE5.116	7
18	SE5.116	8
19	SE5.116	9
20	SE5.116	10
21	SE5.116	11
22	SE5.116	12
23	SE5.116	13
24	SE5.116	14

Obr. A.5: Přehled zapojení portů vana SD5.67 směr SE5.116.

Směr SD5.67	
Port	Směr
1	X
2	X
3	SD5.67
4	SD5.67
5	SD5.67
6	SD5.67
7	SD5.67
8	SD5.67
9	SD5.67
10	SD5.67
11	SD5.67
12	SD5.67

Směr SD5.67	
Port druhá strana	
X	X
X	X
SD5.67	13
SD5.67	14
SD5.67	15
SD5.67	16
SD5.67	17
SD5.67	18
SD5.67	19
SD5.67	20
SD5.67	21
SD5.67	22

Směr SD5.67	
Port	Směr
13	SD5.67
14	SD5.67

Směr SD5.67	
Port druhá strana	
23	
24	

Obr. A.6: Přehled zapojení portů vana SE5.116.

Směr SD5.67		
Port	Směr	Port druhá strana
1	SD5.67	1
2	SD5.67	2
3	SD5.67	3
4	SD5.67	4
5	SD5.67	5
6	SD5.67	6
7	SD5.67	7
8	SD5.67	8
9	SD5.67	9
10	SD5.67	10
11	SD5.67	11
12	SD5.67	12

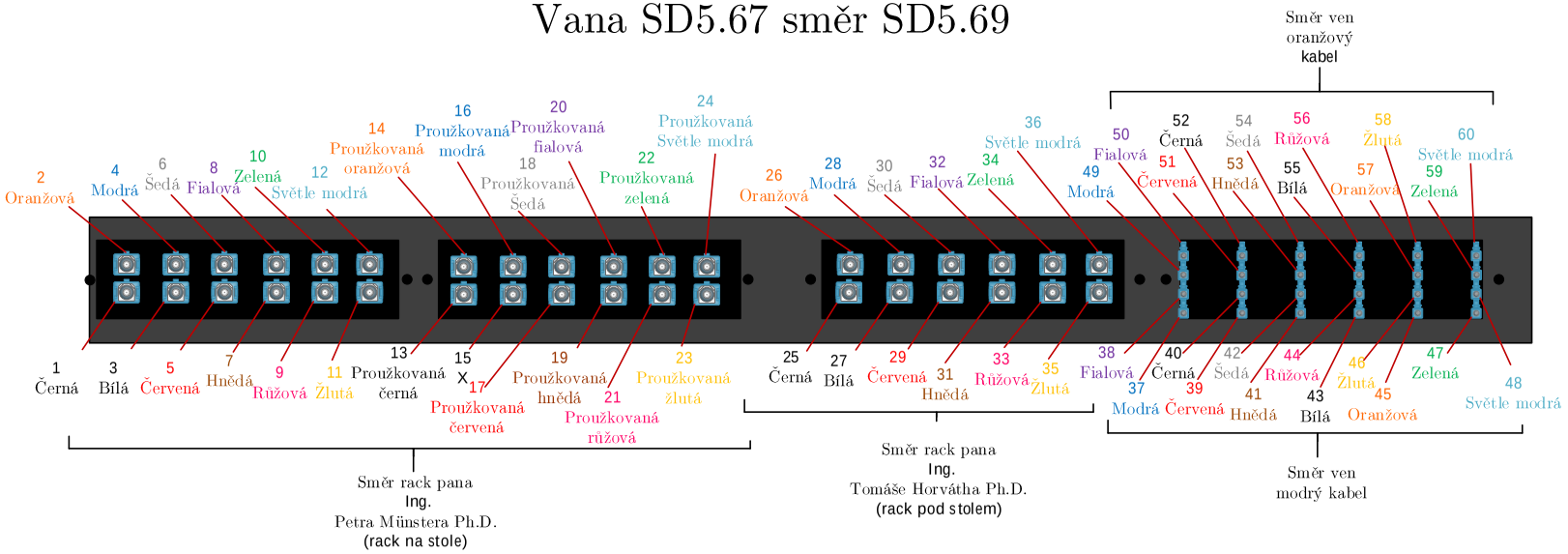
Směr SD5.67		
Port	Směr	Port druhá strana
13	SD5.67	13
14	SD5.67	14
15	X	X
16	SD5.67	16
17	SD5.67	17
18	SD5.67	18
19	SD5.67	19
20	SD5.67	20
21	SD5.67	21
22	SD5.67	22
23	SD5.67	23
24	SD5.67	24

Obr. A.7: Přehled zapojení portů vana SD5.69 rack na stole.

Směr SD5.67		
Port	Směr	Port druhá strana
1	SD5.67	25
2	SD5.67	26
3	SD5.67	27
4	SD5.67	28
5	SD5.67	29
6	SD5.67	30
7	SD5.67	31
8	SD5.67	32
9	SD5.67	33
10	SD5.67	34
11	SD5.67	35
12	SD5.67	36

Obr. A.8: Přehled zapojení portů vana SD5.69 rack pod stolem.

Vana SD5.67 směr SD5.69



Směr SD5.69 (rack na stole)		
Port	Směr	Port druhá strana
1	SD5.69	1
2	SD5.69	2
3	SD5.69	3
4	SD5.69	4
5	SD5.69	5
6	SD5.69	6
7	SD5.69	7
8	SD5.69	8
9	SD5.69	9
10	SD5.69	10
11	SD5.69	11
12	SD5.69	12

Směr SD5.69 (rack na stole)		
Port	Směr	Port druhá strana
13	SD5.69	13
14	SD5.69	14
15	X	X
16	SD5.69	16
17	SD5.69	17
18	SD5.69	18
19	SD5.69	19
20	SD5.69	20
21	SD5.69	21
22	SD5.69	22
23	SD5.69	23
24	SD5.69	24

Směr SD5.69 (rack pod stolem)		
Port	Směr	Port druhá strana
25	SD5.69	1
26	SD5.69	2
27	SD5.69	3
28	SD5.69	4
29	SD5.69	5
30	SD5.69	6
31	SD5.69	7
32	SD5.69	8
33	SD5.69	9
34	SD5.69	10
35	SD5.69	11
36	SD5.69	12

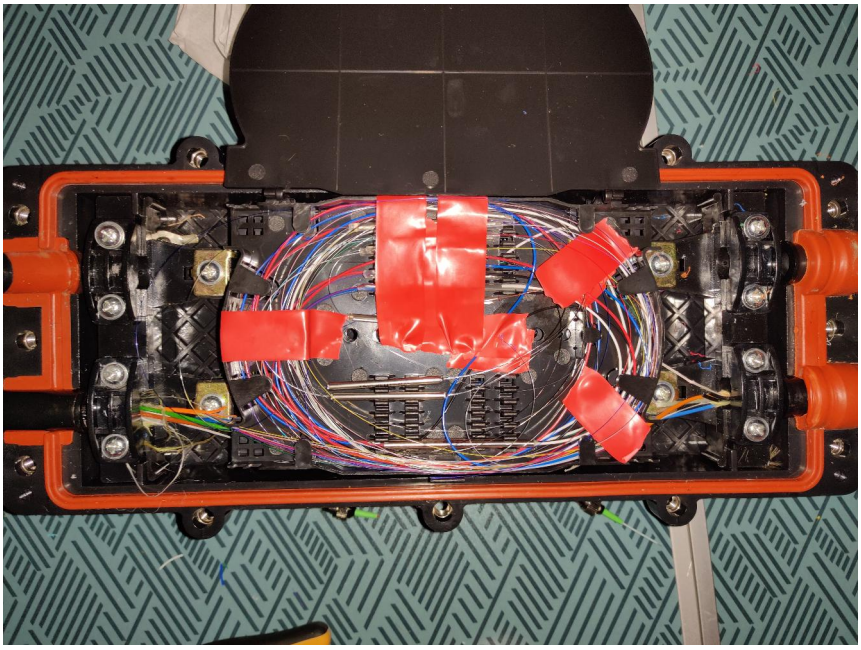
Směr ven modrý kabel		
Port	Směr	Port druhá strana
37	Venkovní šachta	
38	Venkovní šachta	
39	Venkovní šachta	
40	Venkovní šachta	
41	Venkovní šachta	
42	Venkovní šachta	
43	Venkovní šachta	
44	Venkovní šachta	
45	Venkovní šachta	
46	Venkovní šachta	
47	Venkovní šachta	
48	Venkovní šachta	

Směr ven oranžový kabel		
Port	Směr	Port druhá strana
49	Venkovní šachta	
50	Venkovní šachta	
51	Venkovní šachta	
52	Venkovní šachta	
53	Venkovní šachta	
54	Venkovní šachta	
55	Venkovní šachta	
56	Venkovní šachta	
57	Venkovní šachta	
58	Venkovní šachta	
59	Venkovní šachta	
60	Venkovní šachta	

Obr. A.9: Přehled zapojení portů vana SD5.67 směr SD5.69.

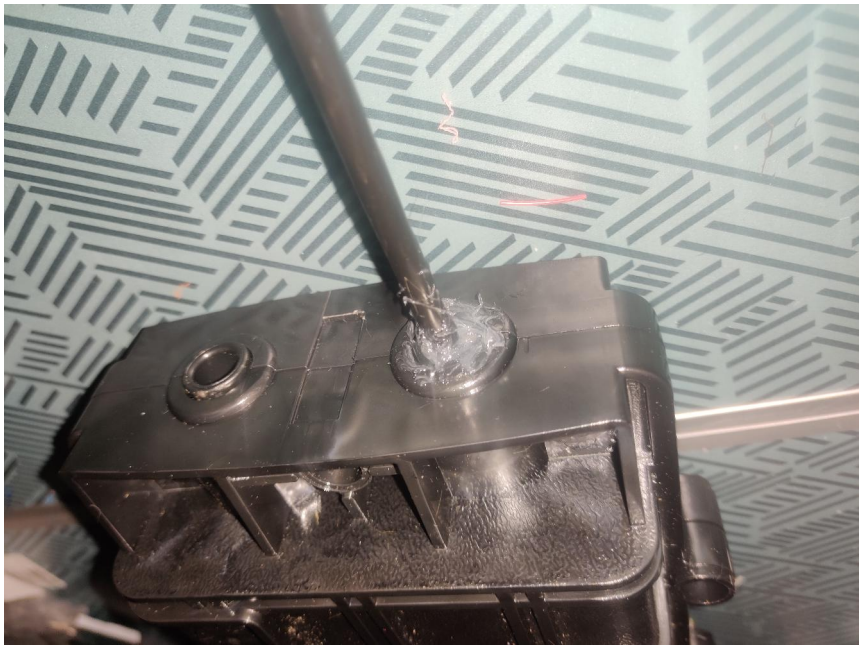
B Fotografie průběhu prací na polygonu

Obr. B.1: Fotografie průběhu prací v prvním optickém boxu.

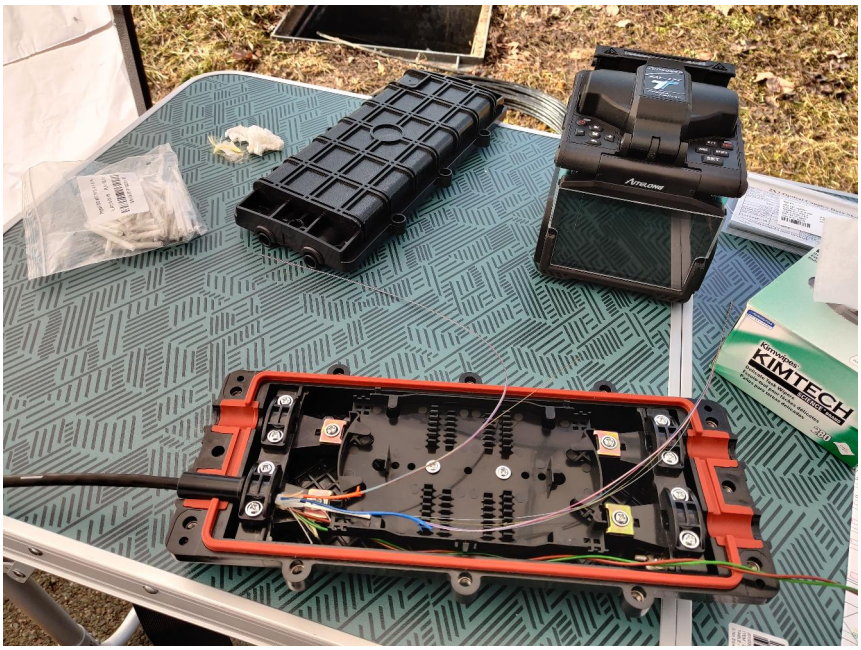


Obr. B.2: Fotografie finalizace prací v prvním optickém boxu.

Obr. B.3: Fotografie s již uzavřenými kazetami v prvním boxu.

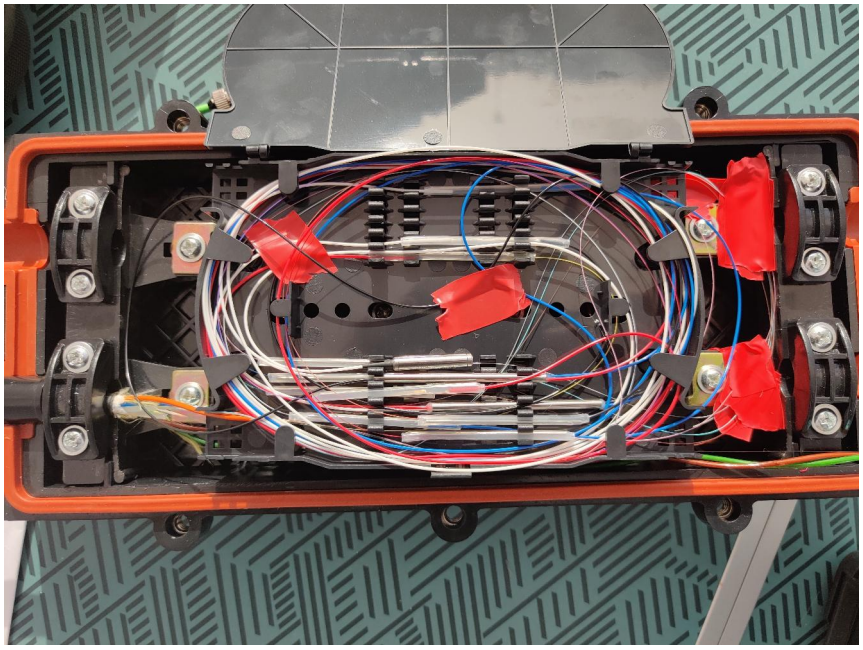


Obr. B.4: Fotografie zatmelení vyvrtaných děr v optickém boxu.



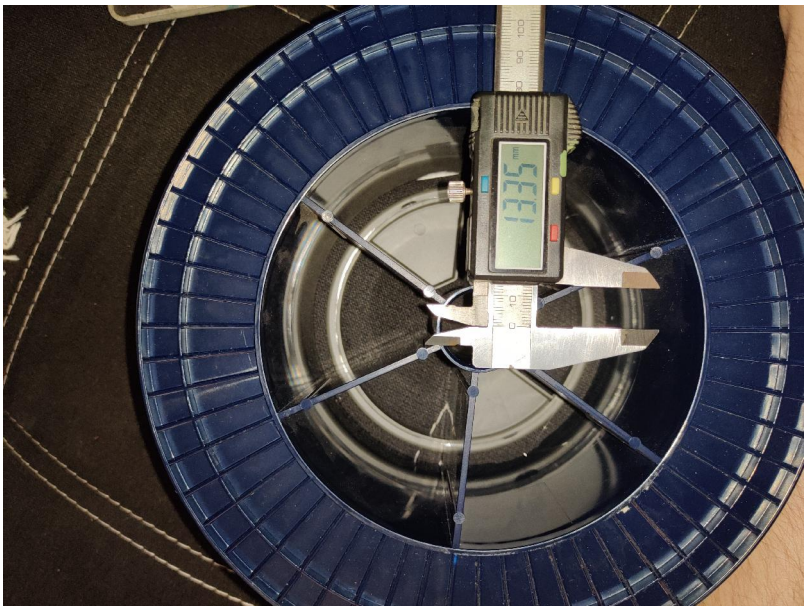
Obr. B.5: Fotografie počátku prací ve druhé šachtě u budovy T7

Obr. B.6: Fotografie průběhu prací ve druhé šachtě u budovy T7.

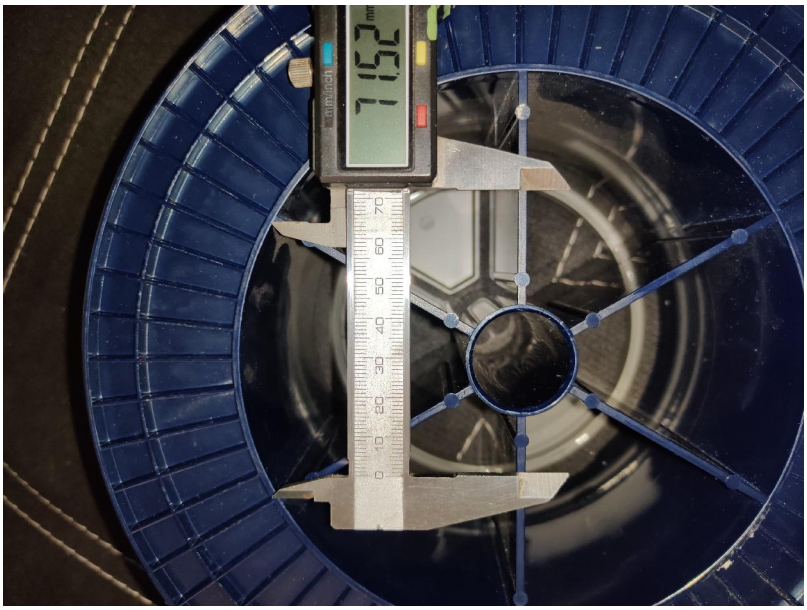


Obr. B.7: Fotografie finalizací prací v druhé šachtě u budovy T7.

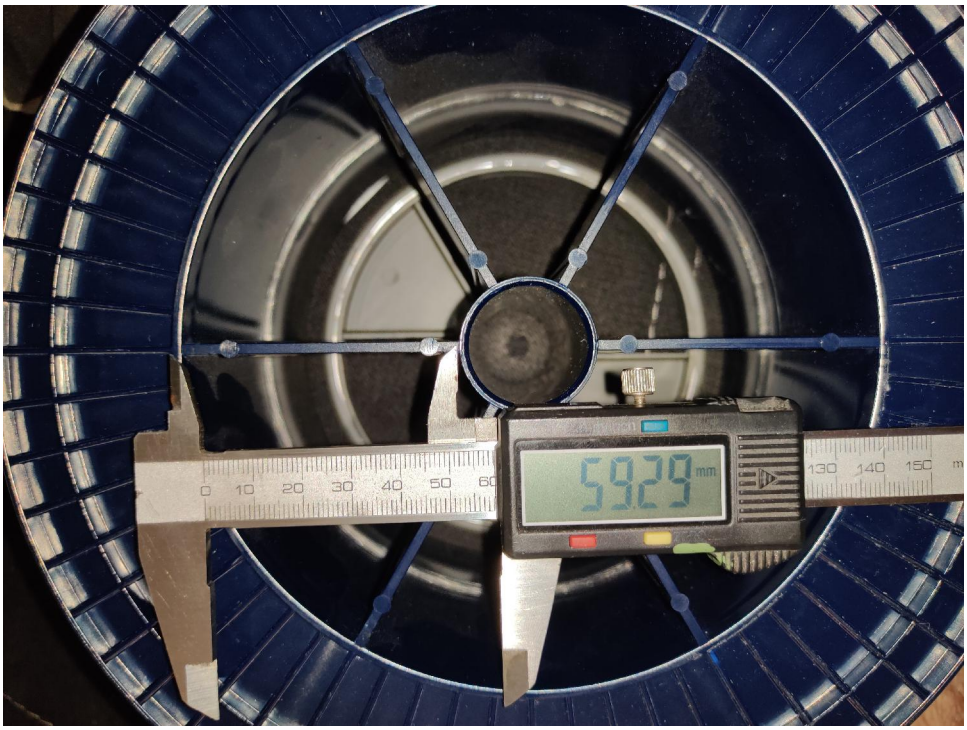
C Fotografie měřených parametrů cívky a vany



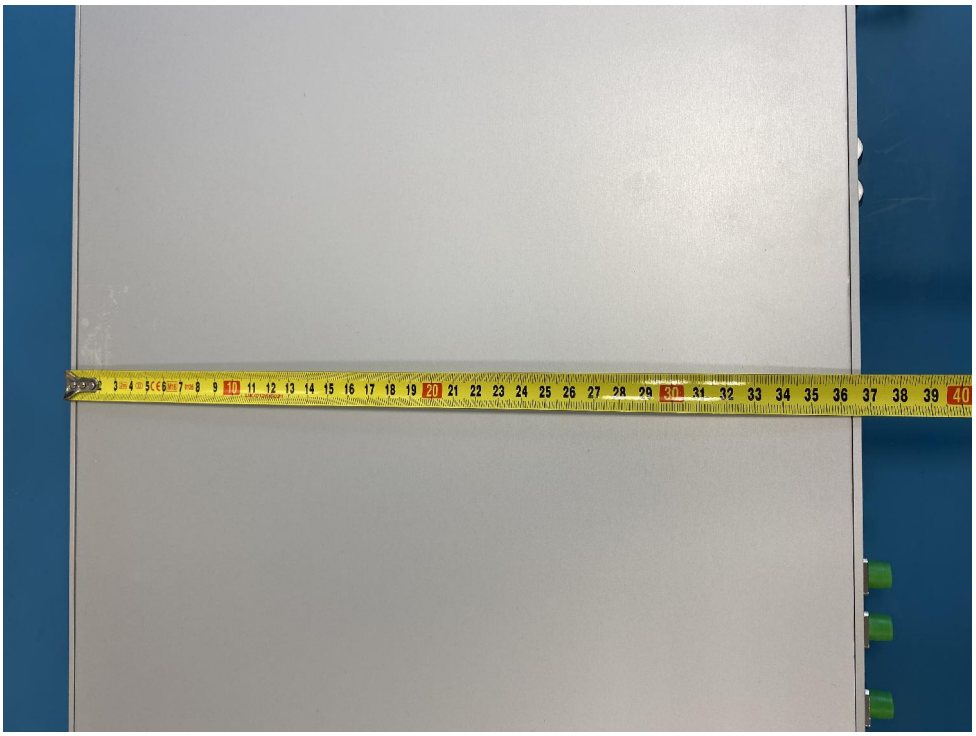
Obr. C.1: Ukázka měření parametrů cívky.



Obr. C.2: Ukázka měření parametrů cívky.

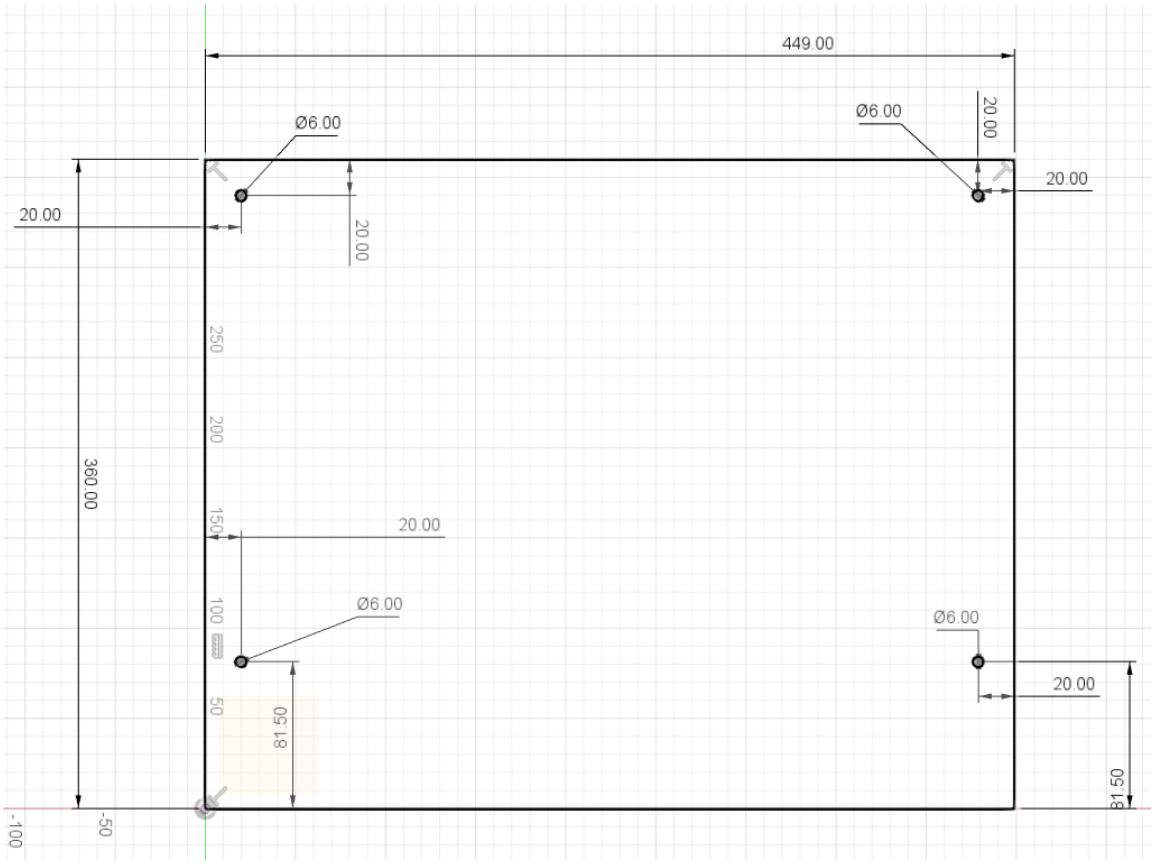


Obr. C.3: Ukázka měření parametrů cívky.

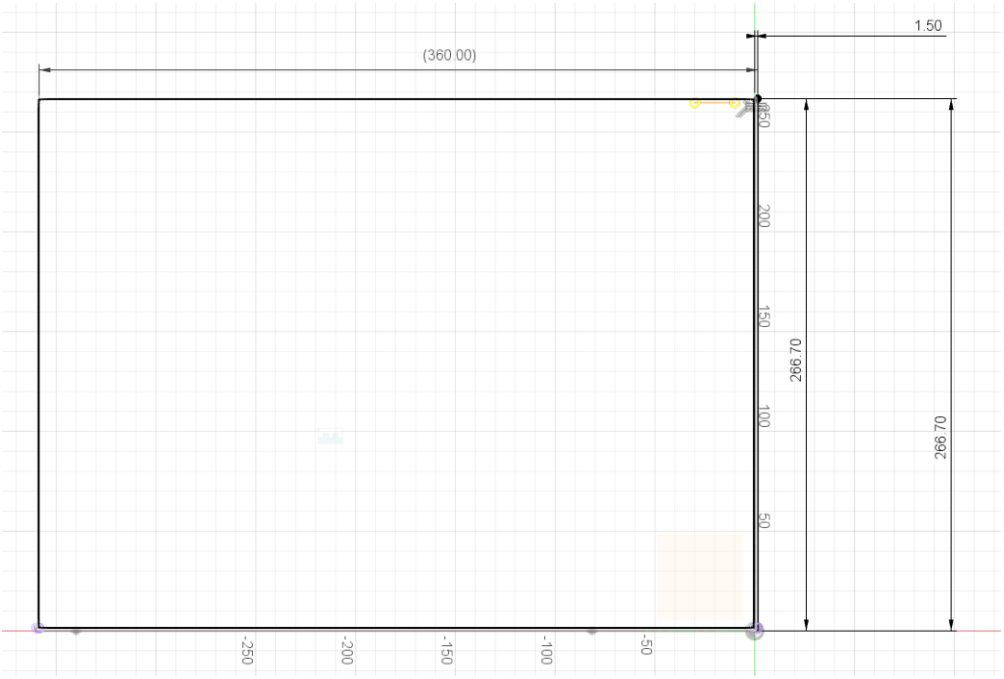


Obr. C.4: Ukázka měření těla vany.

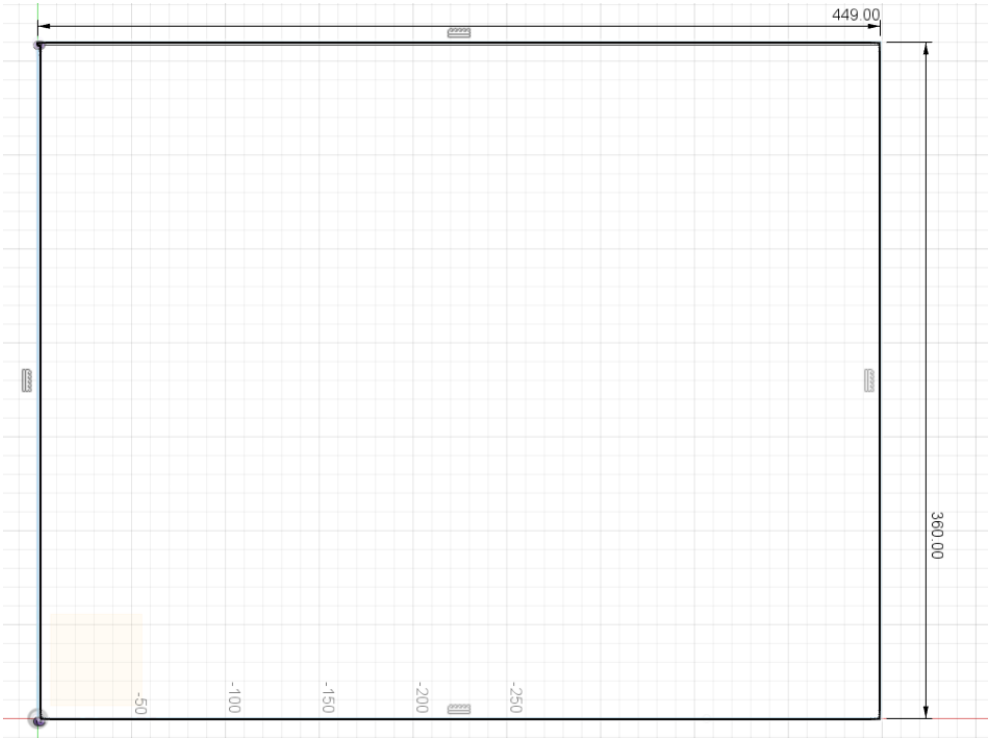
D Parametry jednotlivých komponentů rackové skříně



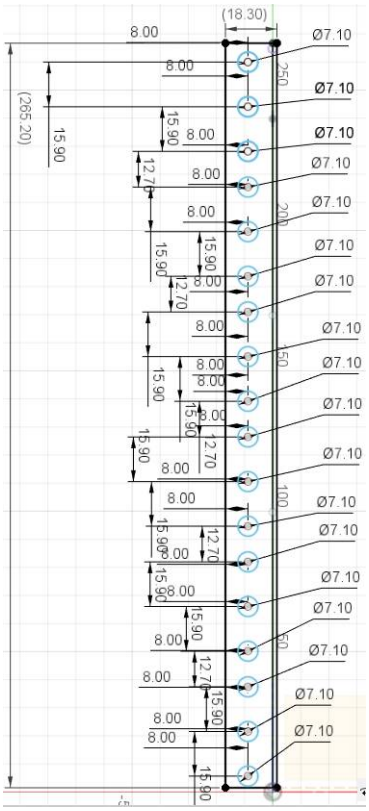
Obr. D.1: Parametry dna skříně.



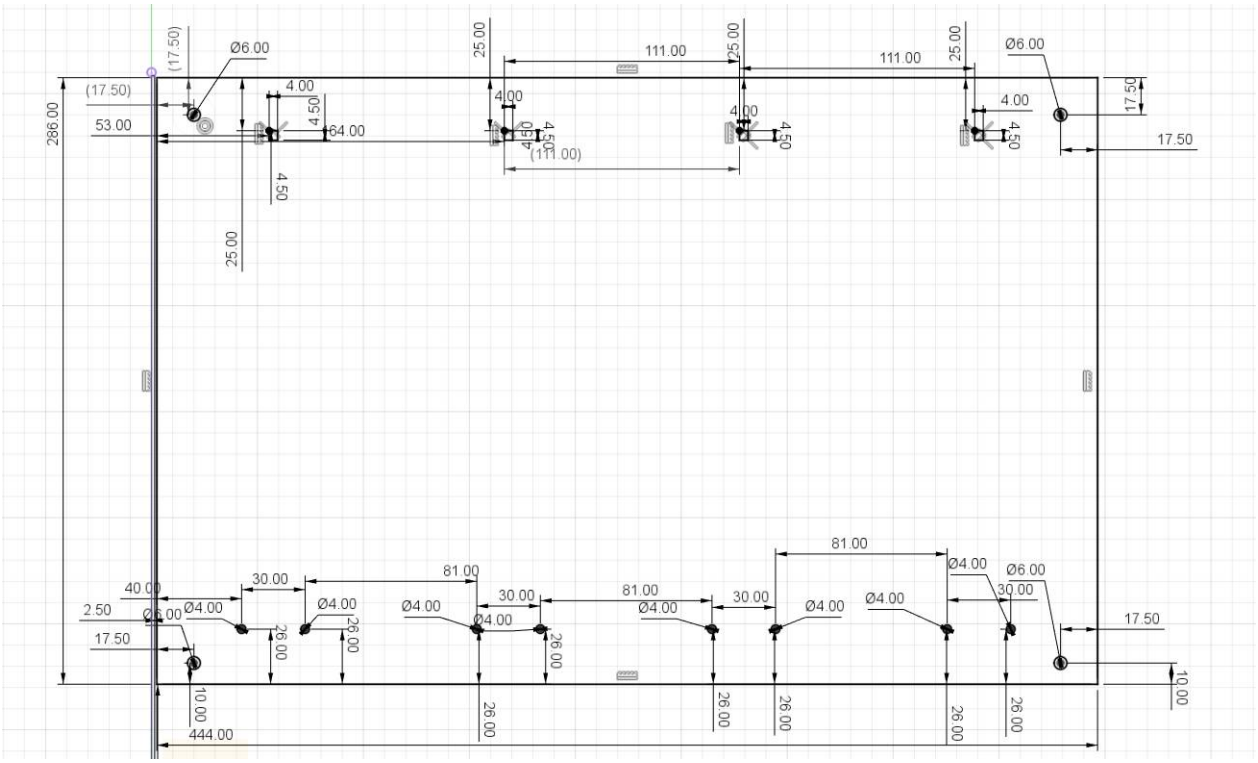
Obr. D.2: Parametry bočnice skříně.



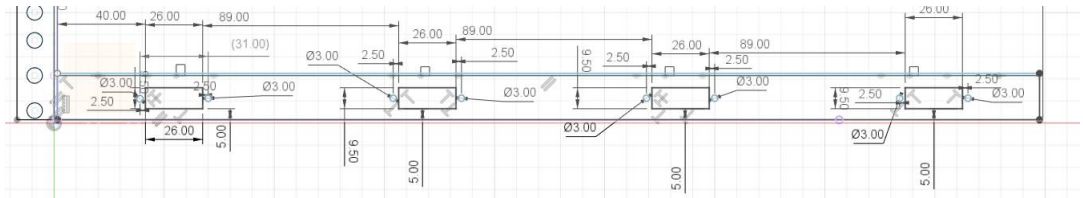
Obr. D.3: Parametry horního krytu skříně.



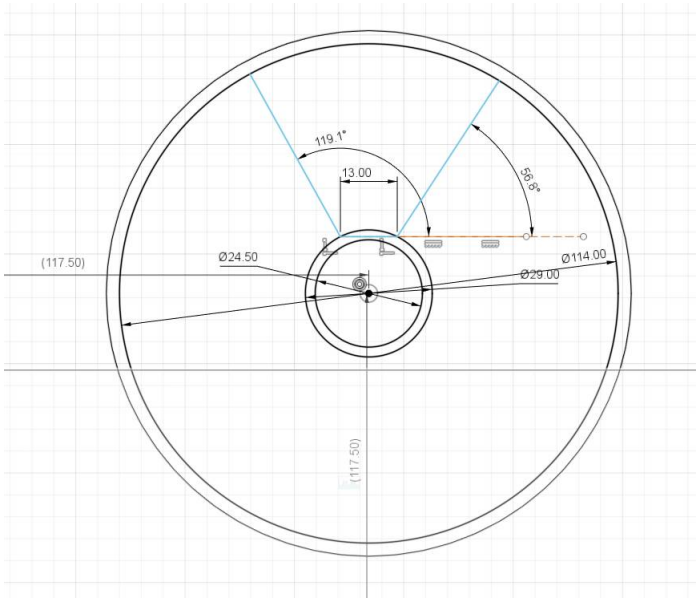
Obr. D.4: Parametry úchopu skříně.



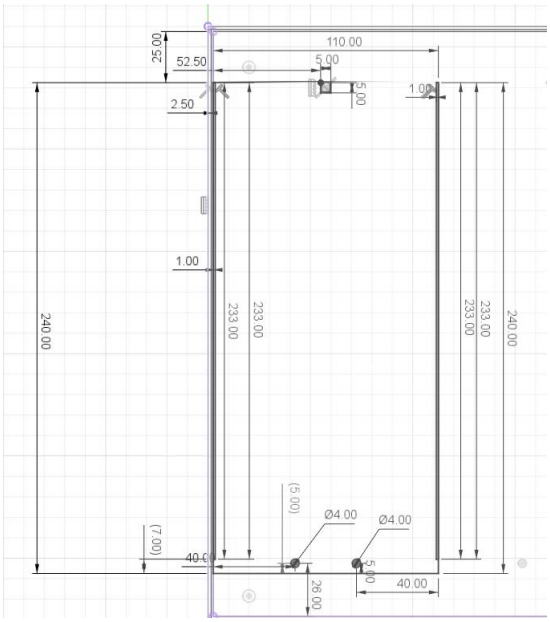
Obr. D.5: Parametry prázdného dna skříně.



Obr. D.6: Parametry spodního čela skříně.



Obr. D.7: Parametry ornamentu úchopu cívky.



Obr. D.8: Parametry dna úchytu pro cívku.