

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky



Diplomová práce

**Analýza dostupných technologických řešení připojení
k internetu v přístupové síti**

Bc. Martin Nový

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.

Studijní program: Elektronika a komunikace, Magisterský

Obor: Komunikační sítě a internet

V Praze, květen 2020

Prohlášení

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

V Praze dne 22. 5. 2020

.....

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nový** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **434812**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Komunikační sítě a internet**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza dostupných technologických řešení připojování k internetu v přístupové síti

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of Available Technological Solutions of Internet Connection in Access Network

Pokyny pro vypracování:

Proveďte analýzu perspektivních technických řešení pro NGA a VHCN. Zaměřte se zejména na řešení FTTH, FTTB, FTTdp s technologií g.fast, případně i řešení připojení v pevném místě pomocí bezdrátových sítí. Zpracujte technicko-ekonomické zhodnocení na základě vytvořené metodiky pro výběr nejvhodnějších technologických řešení a budování sítí s velmi vysokou kapacitou. Uvažujte přitom vybrané typové lokality (typicky rodinné domky i sídliště s velkými bytovými domy).

Seznam doporučené literatury:

- [1] Regulatory, in particular access, regimes for network investment models in Europe. Final report - Study. EU, 2016.
- [2] Národní plán rozvoje sítí NGA. On-line:
<https://www.mpo.cz/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga>
- [3] Doporučení ITU-T G.9701: Fast access to subscriber terminals (G.fast) - Physical layer specification

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **08.01.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

doc. Ing. Jiří Vodrážka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Summary

This diploma thesis deals with comparison of technologies used to connect access networks to the internet which comply with VHCN parameters. Technologies with the transmission capacity at least 1 Gbps are compared by using metrics. Three technologies are selected based on obtained results of comparison. The selected technologies form the basis for economic balance of costs for instalation and maintenance in typical sites. In the final comparison of technologies for respective sites is selected the solution that achieved the best results regard to economic balance which is determined by proportional investment per housing unit.

Index terms: Access network, telecommunication, FTTx, FTTH, FTTB, FTTC, FTTdp, optical access, wireless access, copper metal access, CAPEX, OPEX, LTE-A network, FSO, optical fiber, WiGig, satellite access, WTTH, G.fast.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním typů technologií používaných pro připojení přístupových sítí k internetu, které vyhovují parametrům pro VHCN. Za použití metrik jsou porovnávány technologie s přenosovou kapacitou alespoň 1 Gbit/s a z výsledků jsou vybrány tři technologie. Tyto technologie jsou použity pro ekonomickou rozvahu nákladů na výstavbu a servis v typických lokalitách. Ve výsledném porovnání technologií pro dané lokality je vybrána technologie, která dosahuje nejlepších výsledků v ekonomické rozvaze. Ta je určena poměrnými investicemi na jednu bytovou jednotku.

Klíčová slova: Přístupová síť, telekomunikace, FTTx, FTTH, FTTB, FTTC, FTTdp, optické přístupové sítě, bezdrátové přístupové sítě, metalické přístupové sítě, CAPEX, OPEX, LTE-A síť, FSO, optická vlákna, WiGig, satelitní připojení, WTTH, G.fast.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vodrážkovi, Ph.D. za inspirativní a technické rady a za jeho ochotu, kterou mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zbyňkovi Kocurovi, Ph.D. za pomoc při realizaci praktického měření na technologiích GPON a WiGig. Chtěl bych také poděkoval své rodině i svým blízkým za pomoc a trpělivost při mém studiu.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Motivace	1
1.2	Metoda porovnání technologií	2
1.3	Struktura práce	3
2	Přenos informace	5
2.1	Výhody a nevýhody jednotlivých typů přenosových médií	5
2.1.1	Přenos pomocí metalického kabelu	5
2.1.2	Přenos volným prostorem	6
2.1.3	Přenos pomocí optického vlákna	6
2.2	NGA	7
2.3	VHCN	10
3	Přístupová síť	13
3.1	Metalická přístupová síť	14
3.1.1	Aplikace	15
3.1.2	Technologie	15
3.1.2.1	VDSL2	15
3.1.2.2	G.fast - GigabitDSL	16
3.1.2.3	DOCSIS	16
3.2	Bezdrátová přístupová síť	17
3.2.1	E-band	19
3.2.2	LTE-A	19
3.2.3	802.11ac 5GHz - Wi-Fi	19
3.2.4	802.11ad 60 GHz - WiGig	20
3.2.5	Satelit	21
3.3	Optická přístupová síť	21
3.3.1	FTTH - Fiber to the Home	23
3.3.2	IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers	25
3.3.2.1	Ethernet PON	25
3.3.2.2	10 Gigabit EPON	26
3.3.3	ITU-T - International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector	26
3.3.3.1	Gigabit PON	26
3.3.3.2	X Gigabit-PON	27

3.3.3.3	Next Generation-PON2	27
3.3.4	FSO - Free Space Optic	28
3.4	Hybridní přístupová síť	28
3.4.1	Bezdrátovo - optická přístupová síť	29
3.4.1.1	WTTH - Wireles To The Home	29
3.4.2	Bezdrátovo - metalická přístupová síť	29
3.4.2.1	FWA – Fixed Wireless Access	29
3.4.3	Opticko - metalická přístupová síť	30
3.4.3.1	FTTC - Fiber to the Cabinet	31
3.4.3.2	FTTdp - Fiber to the Distribution Point	31
3.4.3.3	FTTB - Fiber to the Building	31
3.5	Porovnání technických parametrů	32
4	Měření	33
4.1	Měření parametrů 60 GHz PtP spoje	33
4.1.1	Měřicí algoritmy IPerf	38
4.1.2	Naměřené parametry	40
4.2	Měření parametrů GPON	45
4.2.1	Zapojení sestavy pro měření technologie GPON	47
5	Porovnání technologií	51
5.1	Metriky	52
5.1.1	Technické parametry připojení	52
5.2	Aplikace metrik	53
5.3	Ekonomická kalkulace vybraných technologií	55
5.3.1	Výkopy a montáž	56
5.3.2	Materiál	57
5.3.3	Prvky vnitřních rozvodů	57
5.3.4	Příprava pro antény	57
5.3.5	Aktivní technologie	58
6	Výběr technologií pro atrakční lokalitu	59
6.1	Typy atrakčních lokalit	59
6.1.1	Vysoké bytové domy	60
6.1.2	Nízké bytové domy	60
6.1.3	Řadové rodinné domy	60
6.1.4	Rodinné domy	60
6.1.5	Samoty	61
6.2	Parametry atrakčních lokalit	61
6.3	Ekonomická rozvaha napojovaných lokalit	64
6.3.1	Technická připravenost lokality	67
6.3.2	Investice za uplynulých 10 let	68
7	Závěr	69
	Literatura	70

A	Seznam použitých zkratek	75
B	Tabulky	79
B.1	Tabulka hodnot MCS indexů pro IEEE 802.11ad	79
B.2	Cena za položky výstavby	80
B.3	Výstavba lokalit	85
B.3.1	Připravená metalická infrastruktura	86
B.4	Investice za prvních 10 let	87
B.4.1	Připravená metalická infrastruktura	88
C	Měření F-Tester	89
C.1	IPerf měření - porovnání algoritmů	92
C.2	Natočení antén 60 GHz spoje	94
D	Atrakční lokality	97
D.1	Lokalita s vysokými bytovými domy	97
D.2	Lokalita s nízkými bytovými domy	98
D.3	Lokalita s řadovými rodinnými domy s více BJ	99
D.4	Lokalita s rodinnými domy - hustá zástavba	100
D.5	Lokalita s rodinnými domy - řídká zástavba	101
E	Výkopová schémata	103

Seznam obrázků

2.1	Pokrytí internetového připojení ZSJ v současnosti 2018 + výhled 2021 [41] . . .	8
2.2	Negativní trend pro současnost 2015 + budoucnost 2018 + současnost 2018 [42]	9
2.3	Nákres sítě NGN + NGA [32]	10
2.4	Nákres sítě VHCN [32]	11
3.1	Nákres typů připojení k datové síti [37]	13
3.2	Vyzařovací diagram PtP spoje WiGig [50]	17
3.3	Vyzařovací diagram PtMP spoje WiGig [50]	18
3.4	Útlumová charakteristika ve EHF pásmu 10 - 400 GHz [20]	20
3.5	Nákres PtP optického připojení	21
3.6	Nákres PtMP optického připojení	22
3.7	Nákres realizace jednostupňového splitterování	23
3.8	Nákres realizace vícešupňové splitterování	23
3.9	Dělení optických sítí	24
3.10	Porovnání technologií od doporučení od IEEE a ITU-T [31]	25
3.11	Hybridní přístupové sítě využívající v první části bezdrátový spoj	29
3.12	Rozdělení hybridních přístupových sítí využívající přívodní optický kabel	30
4.1	Zařízení použitá v měřicí sestavě ve frekvenčním pásmu 60 GHz	34
4.2	Schéma zapojení měřicí sestavy v pásmu 60 GHz	36
4.3	Úvodní obrazovka webového rozhraní F-Testeru	37
4.4	Ukázka aktuálního stavu F-Testeru během měření	37
4.5	Zobrazení průběhů vyhýbání se zahlcení sítě pro algoritmy IPerf [23]	39
4.6	Zobrazení průběhu přenosové rychlosti pro vyosené AP	42
4.7	Záznam z meteoradaru ze dne 1. května 2020	43
4.8	Průběh měření přenosové rychlosti při silných srážkách	43
4.9	Průběh měření RTT při silných srážkách	44
4.10	Zobrazení ONU	45
4.11	Zobrazení DSLAM	46
4.12	Zobrazení O/E převodníku	47
4.13	Vyfocená zapojená sestava	47
4.14	Schématické zapojení sestavy pro měření parametrů technologie GPON	48
4.15	Výpis z F-Testeru GPON	49
4.16	Výpis z F-Testeru GPON - RTT	50
5.1	Tabulka pro porovnání technologií – data parametrů	53

5.2	Tabulka pro porovnání technologií – rozhodovací úrovně parametrů	54
5.3	Tabulka pro porovnání technologií – výsledky porovnání	54
C.1	Souhrnné informace o proběhlém měření a data o propustnosti a zpoždění	89
C.2	Zobrazení průběhů propustnosti	90
C.3	Časový průběh RTT všech měření	90
C.4	Rozptyl použitých maximálních oken přetížení	91
C.5	Počet přeposlaných paketů	91
C.6	Průběh přenosové rychlosti v měření pomocí algoritmu IPerf Reno	92
C.7	Průběh přenosové rychlosti v měření pomocí algoritmu IPerf Cubic	92
C.8	Průběh přenosové rychlosti v měření pomocí algoritmu IPerf BRR	93
C.9	Fotografie umístění antén na střeše ČVUT FEL - přímé	94
C.10	Fotografie umístění antén na střeše ČVUT FEL - vyosené	95
D.1	Lokalita vysokých BD zobrazená na zvětšené mapě	97
D.2	Detailní zobrazení lokality s vysokými BD	97
D.3	Lokalita nízkých BD zobrazená na zvětšené mapě	98
D.4	Detailní zobrazení lokality s nízkými BD	98
D.5	Lokalita řadových RD zobrazená na zvětšené mapě	99
D.6	Detailní zobrazení lokality řadových RD	99
D.7	Lokalita RD zobrazená na zvětšené mapě	100
D.8	Detailní zobrazení lokality s RD	100
D.9	Lokalita samot zobrazená na zvětšené mapě	101
D.10	Detailní zobrazení lokality samot	101
E.1	Schéma výkopových prací pro vnější trasy výkopů - vysoké BD	103
E.2	Schéma výkopových prací s vnitřní trasou - vysoké BD	104
E.3	Schéma výkopových prací s mini SDF - vysoké BD	105
E.4	Schéma výkopových prací pro vnější trasy výkopů - nízké BD	106
E.5	Schéma výkopových prací s vnitřní trasou - nízké BD	107
E.6	Schéma výkopových prací s mini SDF - nízké BD	108
E.7	Schéma výkopových prací pro trasy výkopů - řadové RD	109
E.8	Schéma rozdělení lokality na 8 podlokalit	110
E.9	Schéma výkopových prací pro trasy výkopů - RD	111
E.10	Schéma výkopových prací pro trasy výkopů - samoty	112

Seznam tabulek

3.1	Porovnání technických parametrů pro technologie VHCN	32
4.1	Výpis z parametrů AP ze vzdáleného přístupu	38
4.2	Průměrné hodnoty měřených parametrů pomocí algoritmů IPerf	40
4.3	Naměřené parametry pro měření využívající celkem 6 datových toků	40
4.4	Porovnání parametrů AP při natočení přímo a při vyosení.	41
5.1	Porovnání cen výkopů použitých pro jednotlivé povrchy	56
6.1	Porovnání parametrů vzorových atrakčních lokalit	63
B.1	Tabulka hodnot MCS indexů a přenosových rychlostí – IEEE 802.11ad [46]	79
B.2	Porovnání cen montáže dílčích prvků pro sdělovací média	80
B.3	Ceny za zafukování	80
B.4	Ceny montáže dílčích prvků pro nadzemní prvky trasy a vnitřních vedení	81
B.5	Cena položek vnitřních rozvodů	81
B.6	Ceny položky projednávání a dokumentace projektů	82
B.7	Ceny za měření, cena je uvedena za měření jednoho vlákna/met. čtyřky	82
B.8	Cena za materiál sdělovacích kabelů a plastové infrastruktury	83
B.9	Cena za materiál rozvaděčů, komor a provažovacích boxů	84
B.10	Cena splitterů	84
B.11	Investice na vybudování lokality vysokých BD	85
B.12	Investice na vybudování lokality nízkých BD	85
B.13	Investice na vybudování lokality řadových RD	85
B.14	Investice na vybudování lokality RD a samot	86
B.15	Investice na vybudování lokalit s přípravou metalické infrastruktury	86
B.16	Investice za 10 let za výstavbu lokality vysokých BD	87
B.17	Investice za 10 let za výstavbu lokality nízkých BD	87
B.18	Investice za 10 let za vybudování lokality řadových RD	87
B.19	Investice za 10 let za vybudování lokality RD a samot	88
B.20	Investice za 10 let za vybudování lokalit s přípravou metalické infrastruktury	88

Kapitola 1

Úvod

Tato diplomová práce porovnává technologická řešení připojování k internetu v přístupových sítích, která jsou tzv. „gigabit ready“. K porovnání jsou uvažovány pouze technologie, které vyhovují jak z pohledu výzev NGA (Next Generation Access – přístupová síť nové generace) a VHCN (Very High Capacity Network – síť s velmi vysokou kapacitou), tak i možnosti přenosové rychlosti vyšší než 1 Gbit/s.

Práce se zabývá ekonomickou rozvahou výstavby a údržby sítě, včetně porovnání technických parametrů použitelných technologií pro VHCN síť. Technologie s nejlepšími výsledky jsou aplikovány pro vybrané typové lokality: vysoké bytové domy, nízké bytové domy, řadové rodinné domy, nová zástavba rodinných domů a vesnická zástavba.

Pro porovnání technologií byla vytvořena metodika a připraven nástroj v programu Excel, ve kterém je možné upravovat hodnotu jednotlivých metrik podle preferencí. Hodnocení je v bodové stupnici od 1 (nejhorší) do 5 (nejlepší) s možností hodnocení 0 (neprošel). Hodnocení 0 je uděleno tehdy, pokud nesplní daná technologie vstupní požadavky (především minimální přenosovou rychlost 1 Gbit/s).

1.1 Motivace

Pro většinu lidí v dnešní době je internetové připojení nedílnou součástí života. Připojení k internetu je možné realizovat pomocí fixní, mobilní, nebo satelitní sítě. Fixní připojení domácí sítě je pro vyspělou společnost základem, podobně jako připojení k vodovodní přípojce či kanalizaci. Obecně však platí, že připojení fixních sítí k internetu nemusí být realizovatelné všude. Internetová přípojka není nezbytným připojením, jako je přípojka elektrická nebo vodovodní.

Tam, kde není možné fixní internet dovést pomocí sdělovacích kabelů, bývá možnost připojit domácnost bezdrátově. Přenos dat Volným prostorem je výhodné oproti ostatním přípojkám (voda, kanalizace, plyn, elektřina, atd.), které vyžadují fyzické připojení k dané rozvodné síti.

I přes skutečnost, že se internet stává součástí našeho každodenního života, není potřeba mít zřízenou internetovou přípojku ke kolaudaci nemovitosti. Pokud si internetovou přípojku sám investor nenaplňuje, budoucí majitelé mohou být nemile překvapeni z absence této přípojky a musí ji vybudovat na vlastní náklady.

V současnosti většina developerů zahrnuje internetovou přípojku do stavebních plánů, protože je velký zájem o rychlý a stabilní internet. S ohledem na dnešní technologie a datové kapacity jsou nové přípojky budovány nejčastěji pomocí optických kabelů, u kterých se k jejich maximální datové kapacitě bylo možné přiblížit pouze v laboratorním prostředí.

1.2 Metoda porovnání technologií

V této práci jsou porovnány 3 typy připojení v přístupové síti: metalické, bezdrátové a optické. V každém typu přístupové sítě je vybrána jedna technologie, která vyjde v porovnání metricky nejlépe pro daná nastavení. Porovnání bylo provedeno na základě technologického (přenosová rychlost, zpoždění, maximální překlenutelná vzdálenost, atd.) a ekonomického (CAPEX¹ - Capital Expenditures, OPEX² - Operating Expenses, správní poplatky, aktivní technologie, pronájem, atd.) hlediska.

Tato nastavení jsou aplikována pro různé typy oblastí, které je potřeba zasíťovat pro splnění výzvy VHCN společně s technologií „gigabit ready“. Tyto oblasti jsou především:

- vysoké bytové domy s velkým množstvím bytových jednotek na jeden vchod (typicky více než 10 bytů na vchod),
- nízké bytové domy s nižším množstvím bytových jednotek na jeden vchod (typicky více než 3 byty a méně než 10 bytů na jeden vchod),
- řadové rodinné domy s jednou až třemi bytovými jednotkami na jeden vchod,
- rodinné domy v lokalitě nové zástavby a
- rodinné domy ve vesnici, které mají velké pozemky a větší vzdálenosti mezi sebou.

¹CAPEX jsou investiční náklady na výstavbu sítě (práce, materiál), nákup komponent a síťových zařízení.

²OPEX jsou neinvestiční náklady na údržbu (opravy, dohled, správa) a provoz sítě (energetická náročnost, vyplácení břemen apod.).

1.3 Struktura práce

Práce je rozdělena do následujících kapitol:

- Kapitola 2 – **Přenos informace**: Stručný souhrn principů připojování k internetu přes 3 typy přípojek: metalické, bezdrátové a optické. Vysvětlení významu výzev NGA a VHCN.
- Kapitola 3 – **Přístupová síť**: Technické parametry technologií používané v přístupových sítích, určení vhodnosti technologií pro použití pro výzvy NGA a VHCN, určení schopnosti přenášet rychlosti alespoň 1 Gbit/s. Porovnání jednotlivých technologií podle technických parametrů.
- Kapitola 4 – **Měření**: Měření parametrů vybraných typů technologií, popis postupu měření na bezdrátovém spoji 60 GHz a technologii GPON.
- Kapitola 5 – **Porovnání technologií**: Popis metrik, které jsou použity pro hodnocení technologií v kategoriích technických parametrů (např. přenosová rychlost, možná agregace, zpoždění, ...) a podle hodnocení výběr jedné technologie z bezdrátového, metalického a optického typu technologií. Ekonomická rozvaha vybraných technologií (CAPEX, OPEX, ...) pro výstavbu daných technologií v atrakčních lokalitách popsane v navazující kapitole.
- Kapitola 6 – **Výběr technologií pro atrakční lokalitu**: Popis vybraných atrakčních lokalit - vysokých a nízkých bytových domů, řadových rodinných domů a rodinných domů v nové zástavbě a „samoty“. Na vybrané lokality je aplikována ekonomická rozvaha za použití technologií vybraných z předchozí kapitoly.
- Kapitola 7 – **Závěr**: Určení nejvhodnější technologie pro každou z atrakčních lokalit na základě vyhodnocení výzkumu.

Kapitola 2

Přenos informace

Základem sdělovacích prostředků je přenos informace, která se může šířit mnoha způsoby. Od dob, kdy se informace předávala slovně (poslové, kteří roznášeli zprávy po okolí a hlásali na náměstích) nebo psanou formou (dopisy, tabule, vyhlášky) uběhla dlouhá doba a informace se začala přenášet rychleji a na větší vzdálenosti. Například pomocí světla (hranice, které se zapalovaly) či v novější době elektrického signálu (telegraf, později telefon) až do současnosti, kdy máme navíc přenos informace pomocí elektromagnetické vlny ve volném prostoru (rádio) či vlnovodu (metalický či optický kabel).

Můžeme tedy říci, že jsou 3 základní metody přenosu informace:

- přenos metalickým kabelem,
- přenos volným prostorem,
- přenos optickým vláknem.

Pro odlišné typy přenosového média platí různé fyzikální vlastnosti daných technologií, které se určitým způsobem odlišují od ostatních. Některé jsou omezeny útlumem prostředí, které nedovoluje přenášet vysokou přenosovou rychlostí na velké vzdálenosti. Ostatní využívají přenosu informace na velké vzdálenosti, ale nedosahují takové rychlosti. V případě kombinace vysoké přenosové rychlosti a velkého dosahu je zde obvykle nevýhodou cena či složitost výstavby dané technologie. Detailním popisem jednotlivých technologií se bude zabývat kapitola [3 Přístupová síť](#).

2.1 Výhody a nevýhody jednotlivých typů přenosových médií

2.1.1 Přenos pomocí metalického kabelu

Hlavní výhodou přenosu informace pomocí metalického kabelu je míra pokrytí domácností/uživatelů. Ta se pohybuje kolem 90 % [43] (data jsou ze dne 31.12.2017 ze stránek [MPO - Ministerstvo průmyslu a obchodu](#)). Míra nepokrytí se týká většinou velice odlehlých oblastí nebo staré zástavby, případně novostaveb, ve kterých se plánovalo připojení optické či bezdrátové (metalické připojení zde už nemělo význam s ohledem na kapacitu

přenosu). Připojení pomocí „párového vodiče“ (twisted pair - symetrický pár) je velmi rozšířené a může se tedy použít pro „hybridní“ internetovou přípojku. Díky trendu připojování pomocí technologií s vysokou přenosovou kapacitou a nízkým dosahem, se poměr připojení domácností/uživatelů pomocí metalických kabelů snižuje.

Velkou nevýhodou připojení pomocí metalického kabelu je vysoká závislost na vzdálenosti připojení poslední míle. Pro technologie připojení s velkou kapacitou přenosu informace platí (například VDSL¹ nebo G.Fast), že dokáží přenášet informace pouze do stovek metrů. Je potřeba zkrátit celkové vzdálenosti využití metalického kabelu pomocí jiné technologie, například optickým kabelem pro backhauling - technologie rDSLAM (remote Digital Subscriber Line Access Multiplexer), FTTC (Fiber To The Cabinet) nebo FTTB (Fiber To The Building). Tímto způsobem se dá využít stávající metalická infrastruktura a „oživit“ dříve nepoužitelné přípojky kvůli malé kapacitě spoje (pomocí ADSL² připojení řádově v kilometrové vzdálenosti, ale pouze v rychlosti do 8 Mbit/s).

2.1.2 Přenos volným prostorem

Obrovská výhoda připojení k internetu volným prostorem je jednoduchá, rychlá a levná instalace (mnohem levnější, pokud se jedná o připojování bez původní infrastruktury připojení). S nadsázkou se dá říct, že bezdrátové připojení je možné zřídit všude, kde to terén či okolní zástavba dovolí. Při připojování v nelicencovaném pásmu jsou správní poplatky nižší.

Pro bezdrátové připojení platí, že záleží na atmosférických podmínkách (zda je jasno, prší nebo je hustá mlha). Každé kmitočtové pásmo je náchylné na jiný typ atmosférických vlivů. Nejčastějším typem připojení v přístupové síti jsou kmitočtová pásma 5 GHz a 60 GHz, která jsou tlumena především deštěm (5 GHz) a nebo molekulami kyslíku (60 GHz). To znamená, že pro oblasti, kde se srážky objevují zřídka, je toto řešení ideální. V oblastech, kde se srážky objevují velmi často, dochází k velkým ztrátám výkonu v přenosu informací na delší vzdálenosti. Obecně platí, že čím kratší je vlnová délka, tím je vyšší útlum při šíření volným prostorem.

Častým řešením pro vysokokapacitní spoj je např. technologie FSO (Free Space Optic). Ta je ale naneštěstí velice náchylná na mlhu nebo smog, který způsobuje rozptyl záření v prostoru a může se snadno stát, že nebude možné navázat spojení.

2.1.3 Přenos pomocí optického vlákna

Výhoda přenosu informací pomocí optického vlákna je nízký útlum na dlouhé vzdálenosti a velmi velká přenosová kapacita. Díky těmto vlastnostem jsou optická vlákna oblíbená pro budování nových tras, ať už v páteřních nebo přístupových sítích. Přenosová kapacita optických vláken prozatím nebyla překonána ani v laboratorních podmínkách, natož v reálném provozu. Prozatím je situace taková, že omezujícím faktorem není přenosové médium, ale technologie, která by mohla využít kapacitu tohoto média.

Nevýhoda, která je u optického vlákna výrazně vyšší než u předchozích dvou technologií, není cena technologie či materiálu, ale cenová náročnost pokládky a instalace optických kabelů. Spolu s tímto problémem jde ruku v ruce i časová náročnost zřízení komunikace

¹VDSL – Very High Speed Digital Subscriber Line

²ADSL – Asymmetric Digital Subscriber Line

pomocí optického vlákna, jedná-li se o novou výstavbu. V případě, že se již v minulosti v lokalitě uskutečnila pokládka trubek nebo chrániček, do kterých se optické kabely instalují, rychlost i ekonomická náročnost vybudování nového kabelu se radikálně snižuje. Pro rychlejší a levnější výstavbu je důležité mít pro optickou infrastrukturu již připravenou „plastovou“ infrastrukturu a spolu s ní již vyřízené náležité formality na úřadech.

Řešení využívající optického vlákna - FTTx (Fiber To The "X") - využívá výhody optického vlákna pro navyšování přenosové rychlosti. Optické kabely jsou využívány především v páteřních trasách, případně jako část přístupové sítě do distribučního bodu. Optická vlákna mají také hlavní podíl ve výzvě VHCN, kde by se měla rozšířit nejenom z páteřní sítě do distribučního bodu, ale také přímo do domu/bytu pomocí FTTH (Fiber to the Home). Tato činnost je podporována Evropskou komisí i jednotlivými státy.

V rámci rozvoje infrastruktury pro elektronické komunikace byl vydán legislativní návrh od EK (Evropské komise), která vydala strategii pro jednotný digitální trh pro Evropu. Zajistila tak přezkum telekomunikačního rámce, jejímž cílem byla stimulace investic do vysokorychlostních širokopásmových sítí a nastolí rovných podmínek pro všechny účastníky trhu³. Na základě směrnic vydané EK vznikly pojmy NGN (Next Generation Network – síť nové generace) a NGA, které jsou použité především ve strategických dokumentech o rozvoji vysokorychlostního internetu a dotačních programech, které se zabývají dotováním rozvoje pro výstavbu vysokorychlostních širokopásmových sítí.

2.2 NGA

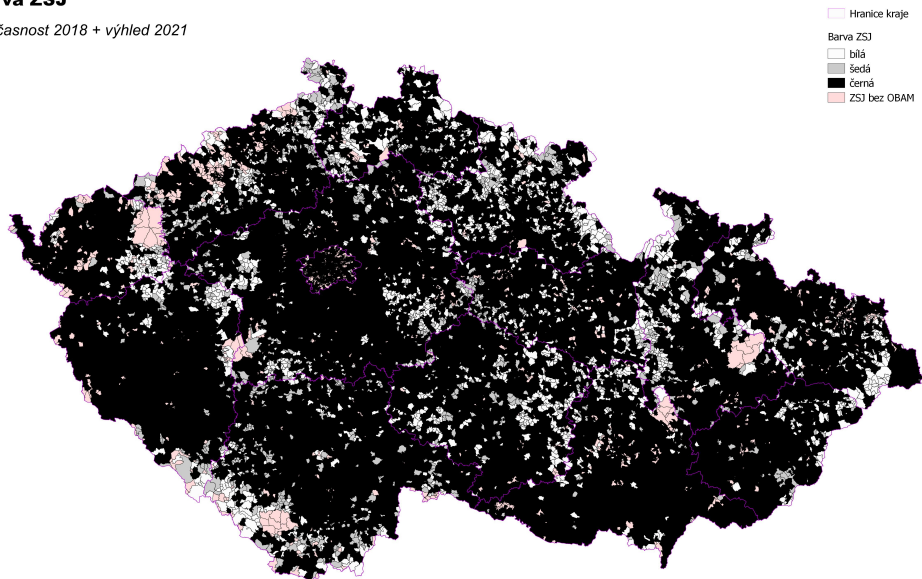
NGA síť souvisí s národním plánem rozvoje sítí nové generace. V národním plánu bylo určeno, aby 100 % obyvatel mělo přístup k minimální rychlosti 30 Mbit/s a alespoň 50 % obyvatel mělo přístup ke 100 Mbit/s do roku 2020 [39]. V rámci tohoto plánu se zahájila výstavba takzvané hybridní sítě, především typu FTTC (technologie rDSLAM), přivedením optiky na BTS (Base Transceiver Station) nebo jiné distribuční body pro bezdrátovou komunikaci. Platí, že se na iniciativu národního plánu rozvinula výstavba optické infrastruktury minimálně k distribučním bodům, ze kterých se nyní dá dosahovat vyšších přenosových rychlostí pro přístupové sítě.

Pro zjištění, jak jsou na tom poskytovatelé internetu s výzvou NGA, vydalo MPO veřejnou konzultaci, ve které mohli všichni vyplnit data ohledně připojení jednotlivých zákazníků. Tato data byla dále analyzovaná a byla z nich vytvořena mapa pokrytí (viz obrázek 2.1).

³Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2018/1972/EU ze dne 11. prosince 2018 o stanovení evropského kodexu pro elektronické komunikace a o změně směrnic 2002/19/ES, 2002/20/ES, 2002/21/ES, 2002/22/ES. In *Úřední věstník*, L 321/36, 17.12.2018. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32018L1972>

Barva ZSJ

Současnost 2018 + výhled 2021



Obrázek 2.1: Pokrytí internetového připojení ZSJ v současnosti 2018 + výhled 2021 [41]

Na obrázku 2.1 je vykreslená mapa České republiky s různě vybarvenými ZSJ (Základní Sídelní Jednotka), které mají bílou, šedou, černou a růžovou barvu. Jednotlivé barvy znamenají:

- **bílá** – místa, kde není přípojka s 30 Mbit/s a není ani jeden operátor, který to má v plánu do 3 let,
- **šedá** – místa, kde má jeden operátor přípojku s 30 Mbit/s nebo ji má v plánu vybudovat do tří let,
- **černá** – místa, kde jsou minimálně 2 operátoři s přípojkou s 30 Mbit/s nebo ji mají v plánu vybudovat do tří let,
- **růžová** – místa, kde jsou ZSJ bez OBAM (Obytná Budova - Adresní Místo),

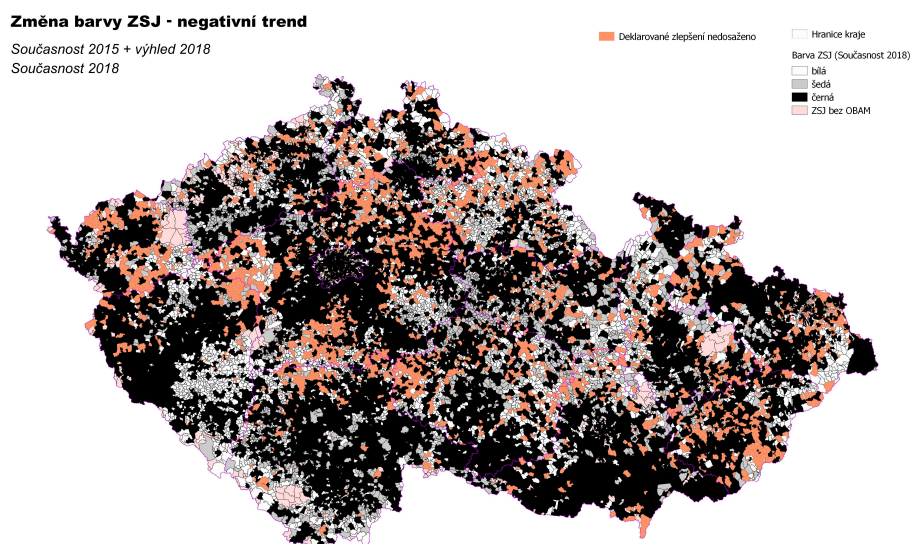
Jednotliví ISP (Internet Service Provider) měli za úkol MPO dodat data ohledně připojení všech AM (Adresní Místo), kterým mohou daní ISP poskytovat službu s odhadovanou rychlostí připojení k internetu. AM jsou rozlišena, zda obsahují obytné prostory či nikoli. Pokud AM obsahují obytné prostory, nazývají se OBAM.

Tato výzva byla provedena z důvodu, aby se zjistil celkový počet bílých míst v České republice, která by mohla čerpat dotační podporu pro výstavbu nové infrastruktury. Podle dat, která byla zveřejněna ve výsledcích Veřejné konzultace [43] vyšlo, že je v České republice skoro 13 miliónů přípojek (4,5 mil. do 30 Mbit/s a 8,3 mil. nad 30 Mbit/s) na celkem 10,5 mil. obyvatel. Je to důsledek toho, že do domácnosti může být přivedeno více typů přípojek. Ty jsou v dokumentu se zpracovanými výsledky uvedeny jako:

- optická síť
- metalická síť – párové vodiče
- metalická síť – koaxiální vodiče
- bezdrátová síť

Jednotlivé podkategorie použitých technologií (například pro metalickou síť – párové vodiče, jsou zde všechny technologie od ADSL přes VDSL až po G.fast) nejsou ve výsledném souboru vypsány, jsou zahrnuty do jednotlivých typů přípojek.

Na obrázku 2.1 je zobrazen předpoklad, který vznikl pro optimistickou budoucnost, kdy realita může být dost odlišná.



Obrázek 2.2: Negativní trend pro současnost 2015 + budoucnost 2018 + současnost 2018 [42]

Na obrázku 2.2 je zobrazený i negativní trend, který oproti optimistickému výhledu z obrázku 2.1 zobrazuje místa, která byla zahrnuta v plánu, ale nebyla realizovaná a ani nebyla v plánu realizace do 3 let.

Tato výzva je takzvaně „přesný souhrn nepřesných čísel“. Jedná se z principu o vyplňování dat jednotlivými ISP, kteří mohou lokalitu „sumarizovat“. Jde o náročnou práci, pokud by měli ISP změřit maximální propustnosti přípojky pro všechny domácnosti ať už z důvodu množství domácností, časové náročnosti kontroly všech přípojek, proměření bezdrátové sítě ve všech možných přístupových bodech či přístupnosti daných přípojek (majitelé nemusí techniky vpustit do domácností za účelem měření přenosové rychlosti přípojky). Proto nemožnou často ISP na 100 % říci, jakou rychlost mají všechny přípojky, mohou pouze odhadovat. K největší sumarizaci dochází u bezdrátové komunikace, kde se vytvoří okruh dostupnosti

služby a v tomto místě jsou data brána v hodnotě maximální rychlosti této služby. Tato rychlost se následně vyplní do formuláře.

Ve formuláři vyplňovali ISP disponibilní přípojky, které mohou realizovat pomocí své sítě. K jednotlivým přípojkám také uváděli, do které rychlostní skupiny patří. Zda je menší než 30 Mbit/s, nebo je hodnota mezi 30 Mbit/s a 100 Mbit/s anebo jestli je rychlost větší jak 100 Mbit/s.

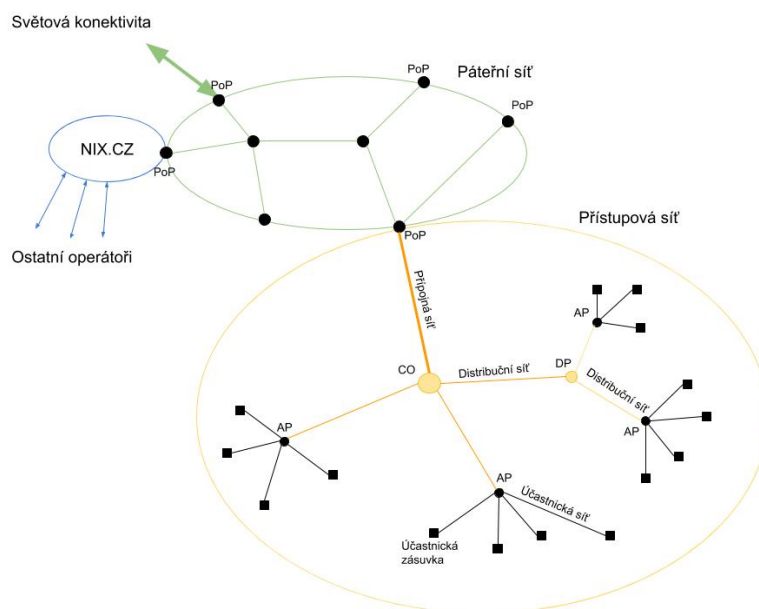
Veškeré informace ohledně NGA je možné nalézt v dokumentu „Národní plán rozvoje sítě nové generace“ [40], který je možné dohledat na [stránkách MPO](#).

2.3 VHCN

VHCN je pojem, který je definován MPO v roce 2020, kdy ve stejném roce měla být dokončena první výzva NGA (která byla zadána v roce 2015 s plány na rok 2020, viz předchozí kapitola). Účelem VHCN je vytvořit do roku 2025 podmínky pro tzv. gigabitovou společnost.

Podle čl. 2 odst. 2, Evropského kodexu elektronických komunikací (dále jen „Kodex“) [45] se rozumí:

„sítí s velmi vysokou kapacitou“ buď síť elektronických komunikací, která zcela sestává z optických prvků přinejmenším do rozvodného bodu v obslužném místě, nebo síť elektronických komunikací, která je schopna za obvyklých podmínek v době špičky dosahovat podobné výkonnosti, pokud jde o dostupnou šířku pásma pro downlink a uplink, odolnost, parametry související s chybou a latencí a její kolísání. Výkonnost sítě lze považovat za podobnou bez ohledu na to, zda se vnímání ze strany koncového uživatele liší kvůli odlišným vlastnostem vyplývajícím z podstaty média, kterým je síť nakonec spojena s koncovým bodem sítě;⁴



Obrázek 2.3: Nákres sítě NGN + NGA [32]

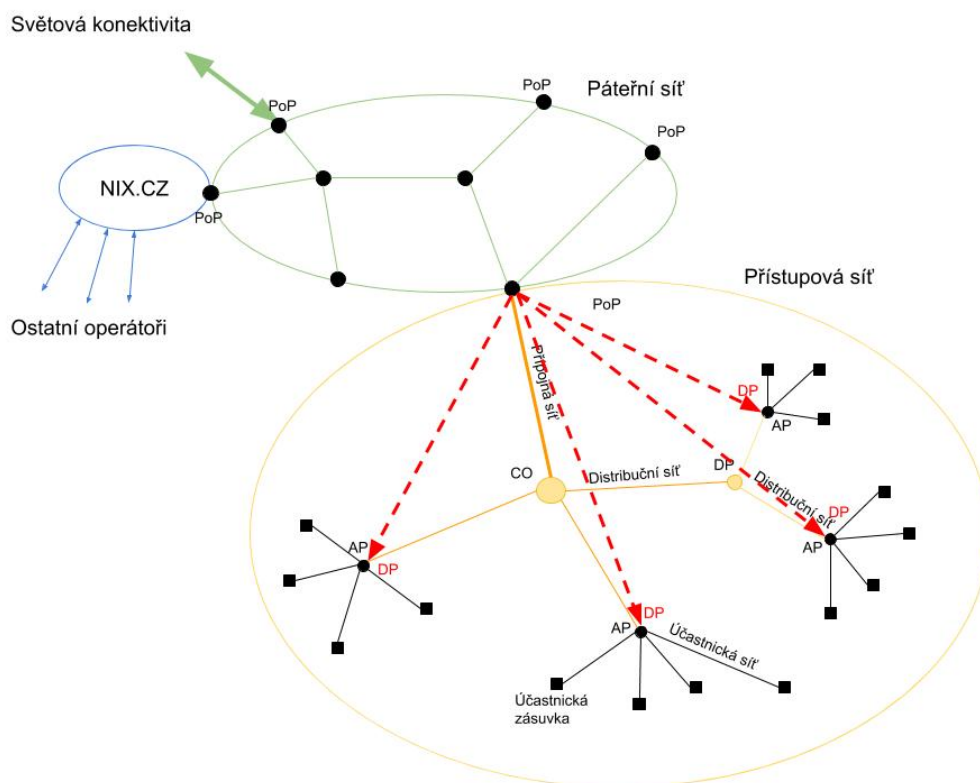
⁴Byl použit oficiální překlad ze stránek Kodexu [45].

Podle definice z Kodexu je tedy zřejmé, že pro VHCN bude potřebné zajistit v přístupové síti přivedení optického kabelu do tzv. distribučního místa (DP – Distribution Point). Pro výzvu NGA vypadá schéma sítě následovně, viz obr. 2.3.

NIX.CZ je společnost, která sdružuje poskytovatele internetových služeb (české i zahraniční) za účelem vzájemného propojení jejich sítí [36]. Poskyvatelé internetových služeb jsou vzájemně napojeni na páteřní síť takzvanými PoP (Point of Presence). Přes PoP jsou realizována připojení jednotlivých poskytovatelů (NIX), připojení do světové konektivity (internet) nebo připojení do jednotlivých přístupových sítí. Do této chvíle se jednalo o NGN.

U přístupové sítě se jedná o NGA. Je zde připojení CO (Central Office) pomocí přípojné sítě, zpravidla optickým kabelem. Z CO jsou vedeny sdělovací kabely do AP (Access Point – soustředovací bod), kde se typ připojení může lišit. V případě, že jsou účastnické zásuvky (zákazník) blízko CO, je možné využít i stávající metalické kabely. Pro optický kabel jsou využity trasy, které jsou vzdálenější a stávající metalické vedení má nedostatečné parametry. V DP je postavená aktivní technologie (např. rDSLAM), do kterého je z CO přiveden optický kabel a v DP je napojena stávající metalická infrastruktura. Díky zkrácení vzdálenosti metalických kabelů je zde možné distribuovat rychlý internet.

V případě VHCN se počítá s tím, že optickým kabelem bude navýšena přenosová kapacita až do AP, které se transformují na DP. Pro síť VHCN se schéma zapojení změní následovně:



Obrázek 2.4: Nákres sítě VHCN [32]

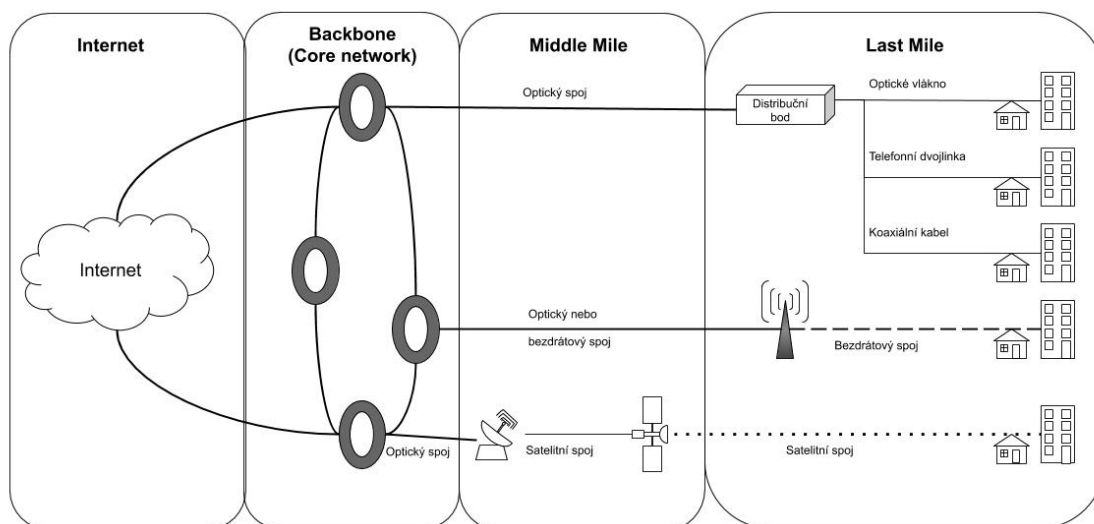
Tímto by se mělo zajistit dostatečně kapacitní připojení koncových zařízení, které by měly být zřízeny dle Kodexu.

Kapitola 3

Přístupová síť

Přístupová síť je součástí telekomunikační sítě. Telekomunikační síť je definována podle §2 odst. 2 zákona č. 151/2000 Sb. o telekomunikacích, jako: „*Telekomunikační sítí se rozumí funkčně propojený soubor telekomunikačních zařízení k přepravě informací mezi koncovými body této sítě nebo soubor rádiových zařízení k přepravě informací nebo jejich vzájemná kombinace.*“

Pro naše účely se budu zabývat pouze datovou sítí a především přístupovou částí sítě. Na obr. 3.1 jsou znázorněny různé typy připojení k datové síti.



Obrázek 3.1: Nákres typů připojení k datové síti [37]

Přístupová síť se skládá z připojení do internetu přes páteřní (tranzitní) síť. K jednotlivým uzlům páteřní sítě jsou připojeny přístupové sítě do distribučního bodu nejčastěji optickým vláknem. Last Mile (poslední míle) je část sdělovacího spoje od poslední aktivní technologie k účastnické zásuvce, od které začíná LAN (Local Area Network - Lokální síť) účastníka. Můžeme se setkat i s pojmem „First Mile“ (první míle), která je synonymem pojmu Last Mile, ale z pohledu od zákazníka.

Telekomunikační síť můžeme rozdělit na 3 základní části:

- páteřní síť
- přístupová síť
- lokální síť

Páteřní síť (backbone, core) je vysoce kapacitní část sítě, která využívá optickou infrastrukturu pro přenos velkého objemu informace. Páteřní síť propojuje místa napojení sítě operátora do sítí ostatních operátorů a propojuje přístupové sítě do internetu (Core). Existuje také pojem přípojná síť (Backhaul), který se používá jako mezi-úroveň páteřní sítě a sítě přístupové.

Přístupová síť (access) je část sítě, která připojuje lokální síť k síti páteřní. Toto připojení může být realizováno mnoha způsoby. Tato práce bude pojednávat o přístupových sítích, které je možné použít s ohledem na budoucí trend zvyšování přenosové kapacity pro klienty. Přístupová síť se skládá z těchto čtyř skupin, které budou dále v práci rozebrány:

- metalická přístupová síť,
- bezdrátová přístupová síť,
- optická přístupová síť a
- hybridní přístupová síť.

Lokální síť (LAN) je část vnitřní sítě zákazníka. Může se jednat o domovní rozvody, kdy jsou jednotlivé byty připojeny k centrálnímu prvku – rozvaděči anebo o samotné bytové rozvody. Místo, které připojuje lokální síť k síti přístupové, se nazývá přístupový bod (access point).

3.1 Metalická přístupová síť

Metalická přístupová síť, jak z názvu vyplývá, se sestává z metalických kabelů. Nejčastěji používané jsou:

- koaxiální kabel
- symetrický pár (*twisted pair*).

Oba typy kabelů mají rozdílnou strukturu a parametry provedení. Pro symetrický pár je nejpoužívanějším typem „křížová čtyřka“. Obsahuje dva páry metalických vodičů, je každý pár vedený ve spirále pro snížení vlivů vnějšího elektromagnetického pole. Tento typ kabelu se používal dříve jako telefonní přípojka, která se nyní pomocí technologie rDSLAM a VDSL2(3) může použít pro vysokorychlostní internet. Dalším typem kabelu používající symetrický pár je UTP (Unshielded Twisted Pair – nestíněný symetrický pár), která je velice často používaná jako vnitřní bytové/domovní metalické rozvody. Oproti telefonnímu kabelu obsahuje čtyři páry metalických vodičů. Nejčastěji používaným materiálem je měď.

Koaxiální kabel používá pro přenos informace taktéž pár metalických vodičů, ale oproti symetrickému páru je struktura axiální. Jeden vodič je umístěn uprostřed vedení a druhý vodič ho kruhově obepíná. Je důležité, aby vnitřní vodič zůstal přesně uprostřed, z důvodu zachování symetrie vůči vnějšímu vodiči.

Přenos informace pomocí metalických vodičů je frekvenčně závislý. Maximální použitelné frekvenční pásmo, ve kterém je ještě možné přenášet signály, dosahuje nejvyšší frekvence řádově stovek MHz (UTP Cat5 dosahuje 100 MHz, Cat6 dosahuje až 250 MHz, koax. dosahuje až 1794 MHz). To se promítne i do maximální přenosové rychlosti, která dosahuje pro Cat5 přibližně 100 Mbit/s, Cat5e 1 Gbit/s a Cat6 až 10 Gbit/s. Tyto rychlosti je možné dosáhnout pouze při vzdálenostech nižších než je 100 m (v případě Cat6 pro 10 Gbit/s maximálně 55 m).

Pro koaxiální kabely se využívá technologie DOCSIS, která využívá šířku pásma 108 až 1218 MHz (varianta DOCSIS 3.1) a dosahuje rychlostí ve směru downstream až 10 Gbit/s a ve směru upstream až 1 Gbit/s. Využívá k tomu OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ortogonální multiplex s frekvenčním dělením) modulace až do hodnot 4096-QAM (Quadrature Amplitude Modulation – kvadraturní amplitudová modulace).

3.1.1 Aplikace

Z důvodu maximální překlenutelné vzdálenosti, na které je vysoce závislá přenosová rychlost, se metalické kabely používají pouze pro propojení na krátké vzdálenosti. UTP jsou tedy často použity v bytových rozvodech, které patří již do lokální sítě. Při použití telefonní křížové čtyřky jsou kabely použity v případě hybridní přístupové sítě, kde je použit přívodní optický kabel a vzdálenost po křížové čtyřce se tím rapidně snížila. Tento typ přístupové sítě bude popsán v kapitole o technologii FTTC, FTTdp (Fiber to the Distribution Point) a FTTB (3.4.3).

U koaxiálních kabelů není problémem maximální překlenutelná vzdálenost, ale přenosová rychlost, která je oproti UTP Cat6 100x nižší, maximální vzdálenost je ale pouze 10x větší. U koaxiálních kabelů se stejně jako u UTP (případně křížové čtyřky) nevyužívá toto řešení jako čistě přístupová síť, ale v kombinaci s technologiemi, které jsou více kapacitní na delší vzdálenosti. Stejně jako u UTP jsou koaxiální kabely použity pro domovní rozvody, především jako pozůstatek po kabelové televizi (CATV – Cable Television).

3.1.2 Technologie

3.1.2.1 VDSL2

VDSL2 technologie je definována doporučením ITU-T G.993.2. [26]

Pro metalická vedení se využívá nejčastěji technologie VDSL2, která dosahuje maximální přenosové rychlosti 260 Mbit/s v sestupném směru a 140 Mbit/s ve vzestupném směru. Využívá až 30 MHz šířku pásma a překlenutelná vzdálenost je až 1,5 km. Existuje neoficiální označení jako VDSL3 či VDSL2+ pro navýšení šířky pásma na maximální hodnotu 35 MHz, ale jedná se stále o technologii VDSL2 s rozšířenou šířkou pásma. [38]

Při použití modulace DMT (Discrete Multitone), která je pro technologie xDSL (rodina technologií DSL - Digital Subscriber Line) běžná, dochází při překlenutí přibližně 100 m k poklesu přenosové rychlosti z důvodu přeslechů na vedení. Z tohoto důvodu byla použita

modulace VDMT (Vectored Discrete Multitone), která vypočítává přeslechy na vedení a aplikuje korekce signálu k tomu, aby tyto přeslechy vyrušila a snížila je pod úroveň šumu pozadí -136 dBm/Hz. Tím se prodlouží vzdálenost, která je překlenutelná při využití maximální propustnosti, na cca 200 m.

Tato technologie je nástupcem klasické ADSL, která využívá stávající telefonní metalické vedení. Na klasické telefonní spojení je od ústředny k účastnické přípojce občas vzdálenost několik kilometrů, což je pro tuto technologii nezdolatelná vzdálenost. Proto je potřeba pro využití nejvyšší přenosové rychlosti danou vzdálenost výrazně snížit. Toto řešení se nazývá FTTC (viz kapitola 3.4.3.1).

3.1.2.2 G.fast - GigabitDSL

G.fast technologie je definována doporučením ITU-T G.9701. [25]

Další technologií, která je použitelná pro přenos informace pomocí metalického kabelu, je G.fast. G.fast je možné použít jak pro symetrický pár, tak i pro koaxiální kabel. Dosahuje vysokých rychlostí oproti ostatním technologiím z rodiny xDSL, ale rychlost je zde kompenzována maximálním dosahem pro maximální kapacitu, která je přibližně 100 metrů. Tuto technologii je proto vhodné použít pro hybridní přístupové sítě, kde je primárně využito optické vlákno a využívá se krátká vzdálenost metalických kabelů (například domovní rozvody). G.fast je výhodné využít pro projekty FTTB či FTTdp, které využívají krátké metalické rozvody (viz kapitola 3.4.3.2).

Technologie G.fast dosahuje rychlosti až 2,5 Gbit/s symetricky, šířka pásma je až 200 MHz a maximální překlenutelná vzdálenost se pohybuje okolo 400 metrů. Pro G.fast platí: G.fast začíná tam, kde VDSL2 svými parametry končí. Přenosová kapacita je velice závislá na vzdálenosti.

Na tuto technologii navazuje **Multi-GigabitDSL (G.mgfast)**, která dosahuje až 10 Gbit/s, využívá až 800 MHz šířku pásma, ale její maximální dosah je okolo 40 m (pro nejvyšší přenosovou kapacitu). [38]

3.1.2.3 DOCSIS

DOCSIS technologie je definována doporučením ITU-T J.222. [27]

Technologie, kterou je možné využít v CATV sítích, je DOCSIS 3.1. Tato technologie může dosahovat přenosové rychlosti ve směru downstream 10+ Gbit/s a ve směru upstream 1+ Gbit/s [29]. Tyto rychlosti jsou sdílené mezi všemi účastníky v jedné síti a je využito v pracovním pásmu i přenos TV vysílání. Přenosová pásma jsou použita pro upstream do 108 (204) MHz a pro downstream 108 (204) až 1218 (1794) MHz. Pro tuto technologii nebylo možné zjistit maximální dosah ani dosah pro maximální propustnost, takže nebylo možné tuto technologii použít v rozvaze.

Výstavba CATV sítě je velmi nákladná. V případě výstavby nových lokalit se spíše využívá výstavby nové optické infrastruktury, která bývá častěji zvolena kvůli svým parametrům v porovnání s technologií DOCSIS.

3.2 Bezdrátová přístupová síť

Bezdrátová přístupová síť je známá zejména díky mobilnímu internetu, který je globálně nejvíce rozšířený. Tento typ přístupové sítě je z velké části bez lokální sítě (zařízení nedistribuuje internet dalším zařízením), avšak existuje možnost využít mobilní internet pro připojení v pevném místě. Dnešní routery umožňují zapojení SIM (Subscriber Identity Modul) karty přímo do modemu v zařízení a tím využívat mobilní internet v lokální síti. Bezdrátový přístup nemusí být použit pouze prostřednictvím mobilního internetu, je zde možnost nechat se připojit pomocí antény na nejbližší přístupový bod sítě (WiFi (Wireless Fidelity)/WiGig (Wireless Gigabit)/E-band), případně využít satelitního připojení.

U připojování pomocí bezdrátového spoje se rozlišují dva způsoby, jakým se distribuuje signál k účastníkům:

- PtP - Point to Point,
- PtMP - Point to MultiPoint.

Uvedené způsoby přenosu signálu se dělí podle zisku antény G_{dBi} , který je definovaný jako poměr intenzity vyzařování dané antény v určitém směru vůči intenzitě referenční antény [47]. Podle zisku antény se určí, zda se jedná o směrovou anténu (PtP) a nebo o anténu sektorovou (PtMP).

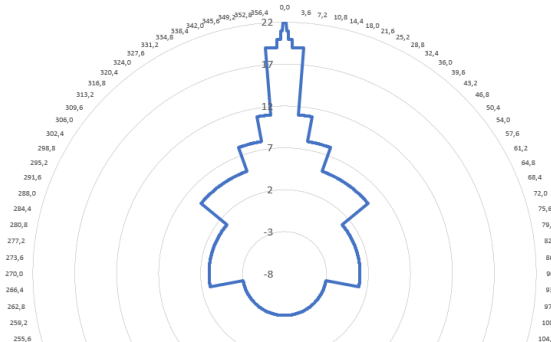
Pro $G_{dBi} > 25$ dBi je stanice považována jako směrová (PtP).

Pro $G_{dBi} \leq 25$ dBi je stanice považována jako sektorová (PtMP).

PtP

Komunikace PtP (česky bod-bod) je komunikace, která plně využívá celou přenosovou kapacitu mezi vysílačem a přijímačem. Tato komunikace je častá pro vysoce kapacitní spoje.

Příklad vyzařovací charakteristiky PtP spoje je uveden na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Vyzařovací diagram PtP spoje WiGig [50]

Na obrázku 3.2 je zobrazena velká směrovost PtP antény, kde pro pokles zisku antény o 3 dB vychází vyzařovací úhel $\pm 3^\circ$. Když se anténa odchýlí více mimo osu, vyzařeny výkon velmi strmě klesá.

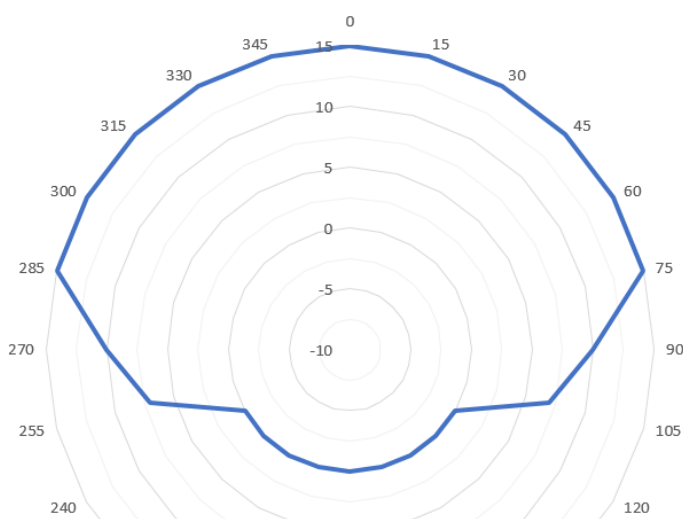
Tento diagram je převzat z návodu ČTÚ (Český Telekomunikační Úřad) pro uživatele Portálu 60 GHz [50]. PtP spojení je určené pro propojení dvou bodů s nízkým vyzařováním do okolí. Tím se předchází překrývání jednotlivých vysílacích paprsků v prostoru. Pokud by se vysílací paprsky překrývaly a fungovaly by ve stejném kmitočtovém pásmu, docházelo by na koncových zařízeních k přeslechům a spojení by bylo zarušené. Docházelo by zde k velké ztrátivosti dat, protože vyhodnocovací obvody by nebyly schopny demodulovat signál. Tomu se předchází zvolením od sebe dostatečně vzdálených pracovních kmitočtových pásmech, na kterých dané spoje vysílají, případně výběrem směrové antény s užším vyzařovacím úhlem.

Ostatní směrové antény nemusí mít vyzařovací charakteristiku, jako bylo zobrazeno v diagramu na obrázku 3.2.

PtMP

Pro přístupové sítě či mobilní terminály je komunikace PtMP (česky bod-multibod) často využita, jelikož není potřeba mít pro každého účastníka jednu anténu vždy alokovanou. Používá se tedy jedna anténa, která je směrem do sítě (internetu), a několik stanic, které se na ní připojují současně. To by za situace PtP spojů nebylo možné.

Příklad charakteristiky zisku sektorové antény je zobrazen na diagramu obr. 3.3:



Obrázek 3.3: Vyzařovací diagram PtMP spoje WiGig [50]

Sektorové antény jsou pro komunikace hojně rozšířené z důvodu komunikace PtMP, kde se využívá jedna vysílací anténa a více antén přijímacích. Může být použita jedna anténa pro komunikaci s více anténami (typické řešení mobilních sítí) na straně připojení do sítě (internetu). Zde se oproti PtP spojení celková přenosová kapacita rozděluje mezi jednotlivé stanice. Realizuje se pomocí přiřazování prostředků (frekvenčního pásma), ve kterém mohou stanice komunikovat se základnovou stanicí nebo aplikací TDM (Time Division Multiplex - časový multiplex), který určuje jednotlivé vysílací intervaly, ve kterých jednotlivé stanice komunikují. Alokace prostředků je řešena různými způsoby, které nejsou předmětem této práce.

3.2.1 E-band

Mezi PtP spoje patří E-band komunikace využívající frekvenční pásmo 71 - 86 GHz, které se nachází v licencované oblasti. Pro přenosové pásmo v E-band je nabízeno na webových stránkách [16] několik možných systémů pro přenos signálu.

První systém je zaměřený na velmi nízké zpoždění (v technické dokumentaci uvádí 83 ns), nazývá se E-Link LLEAP a dosahuje přenosové kapacity 1,25 Gbit/s [18]. Využívá k tomu šířku pásma 1000 MHz.

Druhý systém je zaměřený na přenosovou kapacitu a malé rozměry antény (s rozměry Š x V x H: 231mm x 231 mm x 130 mm). Při využití šířky pásma 250 MHz dosahuje přenosové rychlosti až 1000 Mbit/s. Tento systém se nazývá E-Link Eagle² a jeho zpoždění uvedené v technické dokumentaci dosahuje $<50\mu\text{s}$ [17]. E-Link Eagle² může mít přiřazenou šířku pásma až 750 MHz. To znamená, že výsledná udávaná rychlost může dosahovat až 3 Gbit/s.

3.2.2 LTE-A

Technologie LTE-A (Long Term Evolution - Advanced) se používá pro mobilní internet, který se využívá v mobilních terminálech. Může se použít také jako fixní mobilní internet. LTE-A nedosahuje tak vysoké přenosové rychlosti, jeho výhodou je ale v univerzálnosti a dostupnosti zařízení pro připojení k síti. Využívá se zde více frekvenčních pásem, ve kterých se přidělují subpásma o šířce až 20 MHz pro jednoho uživatele. To znamená, že pokud bychom chtěli využít vyšší přenosové rychlosti, museli bychom použít systém MIMO (Multiple Inputs - Multiple Outputs – Více vysílačů - více přijímačů), případně SIMO (Single Input - Multiple Outputs – Jeden vysílač - více přijímačů). Ta je pro SISO (Single Input - Single Output – jeden přijímač - jeden vysílač) přibližně 300 Mbit/s pro nejvyšší možnou modulaci signálu - 256 QAM. Maximální přenosová rychlost (uváděna 3GPP [28]) je pro DL 3 Gbit/s a UL 1,5 Gbit/s.

3.2.3 802.11ac 5GHz - Wi-Fi

WiFi 5 GHz technologie je definována doporučením IEEE 802.11ac.

Nejrozšířenější technologií v přístupové síti v České republice je technologie WiFi. Ta je v České republice nejvíce rozšířená v připojování k internetu v přístupové síti ze všech států Evropské unie. Dosahuje přibližně k 32 % celkového zastoupení aktivních přípojek za rok 2018 [51]. V tomto směru se jedná o značný podíl (xDSL přípojky dosahují 25 % zastoupení, FTTH/B dosahuje 17 %, CATV 17 % a fixní LTE dosahuje 9 %).

WiFi připojení je oblíbené především kvůli nízkým nákladům na výstavbu a dostačujícím parametrům pro většinu uživatelů. Běžné tarify pro WiFi internetové připojení nabízejí symetrickou přenosovou rychlost 30 Mbit/s. V případě využití plné kapacity takového spojení je možné přehrávat online *stream* FullHD přenosy bez nutného načítání. Bohužel u bezdrátových spojů dochází k častému kolísání parametrů přenosu (přenosová rychlost, latence, chybovost), a není proto vhodné pro dlouhotrvající *stream* služby (např. online televize). Z důvodu velkého využití v nelicencovaném pásmu zde dochází k velkým přeslechům od okolních stanic. Když se rozhlédneme ve městské zástavbě, můžeme pozorovat na anténních stojanech velké množství nainstalovaných antén pro komunikaci technologií WiFi.

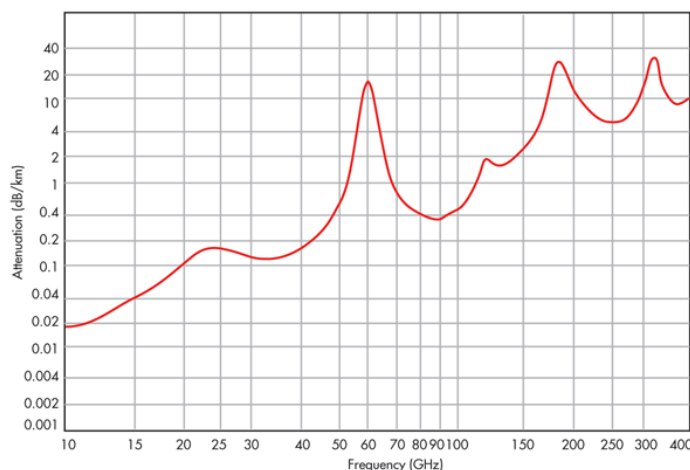
Pro použití kapacitních spojů je typická přenosová rychlost SISO spoje s využitím 80 MHz šířky pásma okolo 0,5 Gbit/s. Při využití 2x2 MIMO vychází přenosová rychlost 866 Mbit/s [3]. Pro vysílací systém s využitím 4x Tx (4x4 MIMO) vychází přenosová kapacita přibližně 1,56 Gbit/s a pro nejvíce kapacitní variantu vychází rychlost až 6,93 Gbit/s (šířka pásma 160 MHz s 8x Tx (8x8 MIMO), využije se spojení 2 kanálů o šířce pásma 80 MHz).

3.2.4 802.11ad 60 GHz - WiGig

WiGig (Wireless Gigabit) technologie je definována doporučením IEEE 802.11ad.

Tato technologie není vhodná pro vzdálené spoje, jelikož dochází k vysokému útlumu na frekvencích okolo 60 GHz (Evropa využívá pásmo od 57 GHz do 66 GHz) v důsledku absorpce záření v atmosféře (molekuly kyslíku). Proto není možné využívat přenos na velkou vzdálenost, která je doporučena pro zachování parametrů přenosu na 2 km pro PtP spoje. Pro spoje typu PtMP je doporučena maximální vzdálenost dána výrobcem na 200+ metrů. Navzdory velkým útlumům je technologie hojně využívána.

Na obr. 3.4 je zobrazena útlumová charakteristika ve EHF (Extreme High Frequency) pásmu 10 - 400 GHz:



Obrázek 3.4: Útlumová charakteristika ve EHF pásmu 10 - 400 GHz [20]

Z charakteristiky je patrné, že pásmo pro WiGig (57 až 64 GHz) dosahuje až stokrát většího útlumu, oproti okolí tohoto pásma (maximální útlum dosahuje přibližně 16 dB/km o kmitočtu 60 GHz, vedlejší kmitočty cca 32 GHz dosahuje útlumu přibližně 0,1 dB/km).

V České republice se otevřela možnost využití tohoto pásma pomocí registrace dne 15.1.2020 a ke dni 24.1.2020 bylo na stránkách ČTÚ [53] zaregistrováno přibližně 18,5 tisíce spojů, z toho typu *FS PtP* (Fixed Service, 12 tisíce), *WiGig PtP* (2,5 tisíce) a *WiGig PtMP* (4 tisíce).

WiGig využívá nevýhody využívaného pásma – vysoký útlum, jako přirozený filtr. Pro spoje, které jsou od sebe vzdálené maximálně pár kilometrů, a nemají v dosahu vysílač, který by vysílal ve stejném pásmu, se nevyskytuje rušení od jiných vysílačů. To ve výsledku znamená, že při správném rozložení ve vysílacím spektru může být oproti jiným technologiím vyšší hustota využitelnosti spektra.

Dalším důležitým parametrem je šířka využitelného pásma, které je nelicencované. Oproti ostatním telekomunikačním technologiím, které používají bezdrátový přenos informace, WiGig využívá rozsáhlejší pásmo, než ostatní. Použité kanály jsou od sebe vzdáleny 2,14 GHz. Přenosová kapacita spoje může dosáhnout až 6,75 Gbit/s.

3.2.5 Satelit

Satelitní připojení je z geografického hlediska pro Českou republiku nevhodné, protože zde máme relativně malé vzdálenosti, které se mohou pokrýt terestriálním bezdrátovým připojením. Satelitní připojení je vhodné použít pro odlehlá místa, kde už nelze využít terestriálního připojení (typicky pouštní oblasti nebo odlehlá, málo obydlená místa). U nás lze využít řádově levnějšího připojení s lepšími parametry přenosu (vyšší přenosová rychlost, latence). Z tohoto důvodu není v České republice v hojném zastoupení. Běžně dostupná přenosová rychlost je kolem 50 Mbit/s na území České republiky. Maximální propustnost technologie může dosahovat až 1 Gbit/s.

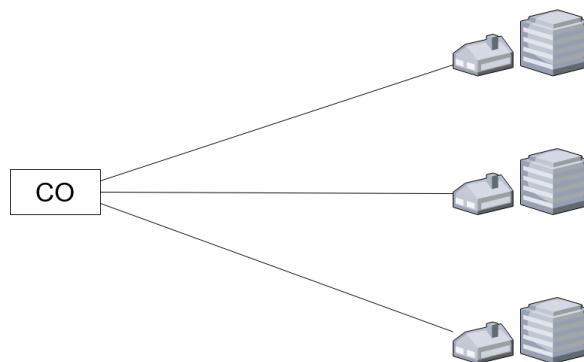
3.3 Optická přístupová síť

V návaznosti na výzvu VHCN hrají optická vlákna hlavní roli. Podstatné jsou jejich parametry. Optická vlákna zvládají vysokokapacitní přenosy na velké vzdálenosti (až stovky Gbit/s na desítky kilometrů) bez regenerace signálu. Z tohoto důvodu byly optické kabely využity pro páteřní a transportní sítě. Jak bylo zmíněno v úvodu, instalace optických vláken je náročná procedura jak z hlediska časového (projednání územního rozhodnutí, smlouvy o služebnosti, provedení výkopů, . . .), tak ekonomického (zhotovení technické dokumentace, provedení výkopů, aktivní technologie, . . .).

Tato práce se nezabývá výhodnými vlastnostmi optických vláken v páteřních trasách, i když jsou základem pro všechny aplikace vyhovující výzvě VHCN.

Připojení optickými vlákny může být realizováno podobně jako v bezdrátovém případě:

- PtP.
- PtMP.

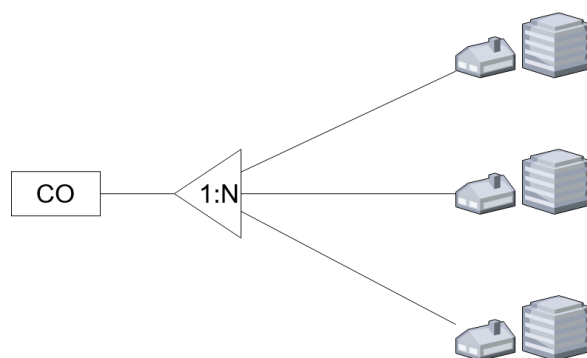


Obrázek 3.5: Nákres PtP optického připojení

V případě **PtP spoje** je vedeno jedno nebo dvě optická vlákna jako komunikační spojení mezi PoP/CO a zákazníkem (záleží, zda je komunikace simplexní či duplexní). Je zde velká variace možných typů technologií pro připojení širokou škálou rychlostí, které se mohou jednoduše nahradit, či vyměnit, což je hlavní výhodou PtP optického připojení.

Velká nevýhoda ovšem nastává v tzv. *cable management*, kdy je jedno, popřípadě dvě vlákna pro komunikaci s jedním subjektem. Pokud se jedná o firmy, které zavedou optické vlákno do technické místnosti a rozvádějí celkovou kapacitu mezi celou budovu, není tento problém tak znatelný. Jestliže se jedná o BD (bytový dům) s velkým počtem bytů (např. stovky – 240 BJ (bytových jednotek)), dochází v případě PtP spojení k velkému využití vláken a nutnosti použití vysokokapacitního optického kabelu (např. 288 vláken). Tato vlákna je potřeba ukončit v optickém rozvaděči. Pokud by v oblasti bylo připojeno větší množství takto kapacitních BD, došlo by k velkému využití prostoru v CO. Muselo by být svařeno velké množství vláken do rozvaděčů (přesahující například tisíce vláken v hustě zabydlené lokalitě), které by bylo finančně i časově náročné na provedení.

PtMP spoje využívají pro přenos informace sdílenou část vlákna, které vede do místa, kde je vlákno rozděleno do několika větví, tzv. *splitter*. Maximální poměr rozdělení je dán technologií, pohybuje se od poměru 1 na 16 (1:16) až 1 na 256 (1:256) pro jedno přívodní vlákno.



Obrázek 3.6: Nákres PtMP optického připojení

Splitter je pasivní součástka (nepotřebuje žádné napájení). Funkcí splitteru je rozdělení optického výkonu do jednotlivých větví, které může být symetrické, nebo asymetrické.

U symetrického splitteru se přerozděluje energie mezi větve rovnoměrně a nejjednodušší realizace symetrického splitteru jsou s počtem vývodů nejčastěji 2^x . Tyto splitters jsou nejvíce používané pro realizaci sítí PON (Passive Optical Network). Poměr rozdělení výkonu splitteru se uvádí ve formátu *počet vstupů : počet výstupů*, např. 1:16 (1 vstup rozdělující svůj výkon na 16 výstupů).

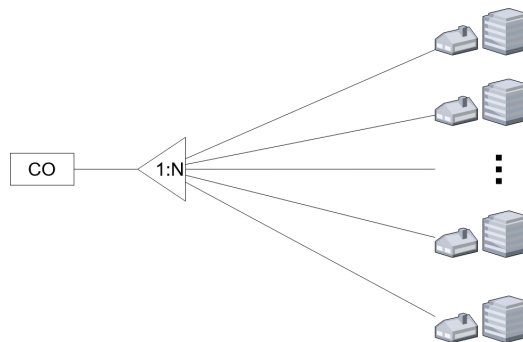
Asymetrické splittersy energii do svých větví rozdělují nerovnoměrně. Častým využitím asymetrického spoje je použití poměru, který není $1:2^x$, aby výsledný poměr rozdělení energie byl symetrický (např. poměr 1:3). Dalším využitím asymetrického splitteru je pro použití dohledového systému, který využívá poměr např. 1:99, aby v průběžné trase nedocházelo k velkému útlumu a vyvázané 1 % energie bylo zapojeno do dohledového zařízení.

3.3.1 FTTH - Fiber to the Home

Nejčastějším případem využití technologie PON v přístupové síti je FTTH (volně přeloženo „vlákno do domácností“). Tento princip zapojení v přístupové síti je proveden přes topologii stromu. V terminologii optických vláken poté rozdělujeme typy zapojení na jednostupňové a vícestupňové splitterování.

Jednostupňové splitterování je realizováno pomocí jednoho bodu, do kterého se přivede přívodní vlákno z CO. Z tohoto bodu se veškerá vlákna rozdělí dle potřebného nebo maximálního splitterovacího poměru (ten je daný použitou technologií).

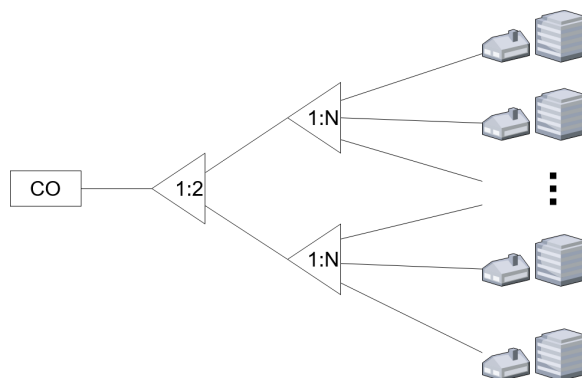
Princip realizace jednostupňového splitterování je naznačen na obrázku 3.7.



Obrázek 3.7: Nákres realizace jednostupňového splitterování

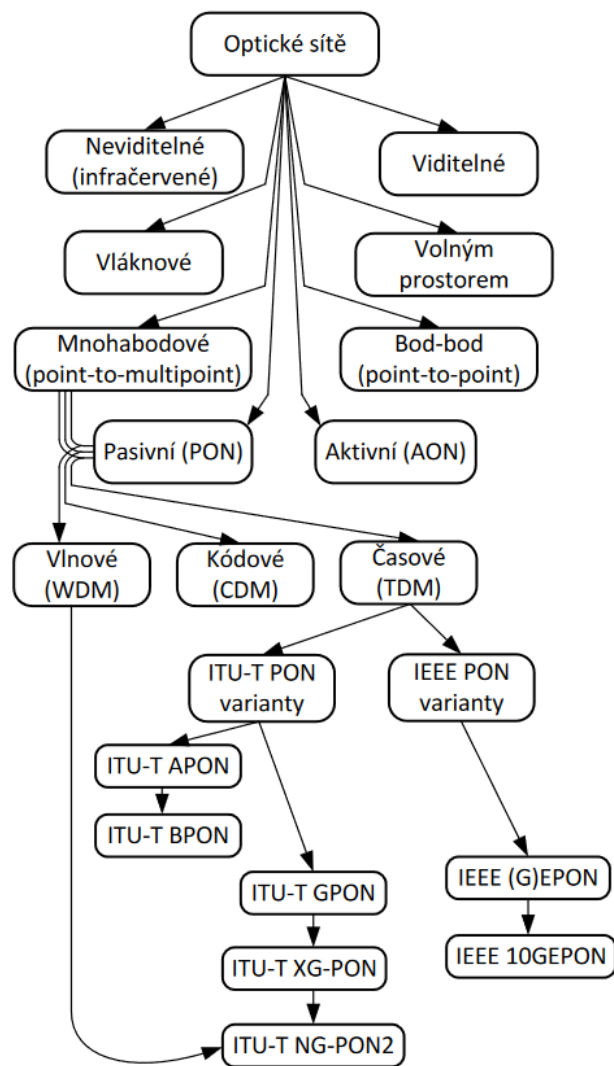
Typ zapojení zobrazený na obr. 3.7 je vhodný pro místa, která od sebe nejsou příliš vzdálená, a proto nemusí být použito mnoho dalších vláken pro připojení všech potřebných míst (bytové domy, sídliště).

Vícestupňové splitterování využívá více bodů, ve kterých dochází k rozdělení vlákna (zobrazeno na obrázku 3.8).



Obrázek 3.8: Nákres realizace vícestupňového splitterování

Tento typ zapojení je vhodný pro menší počet koncových přípojek, které jsou od sebe více vzdálené, proto je vhodnější využít jedno dlouhé vlákno namísto většího svazku vláken (např. pro několika kilometrové vzdálenosti mezi přípojnými body).



Obrázek 3.9: Dělení optických sítí [31]

Na obr 3.9 je zobrazené dělení optických sítí zaměřené na sítě PON. Pro účely této práce je důležité dělení až od PON - pasivní.

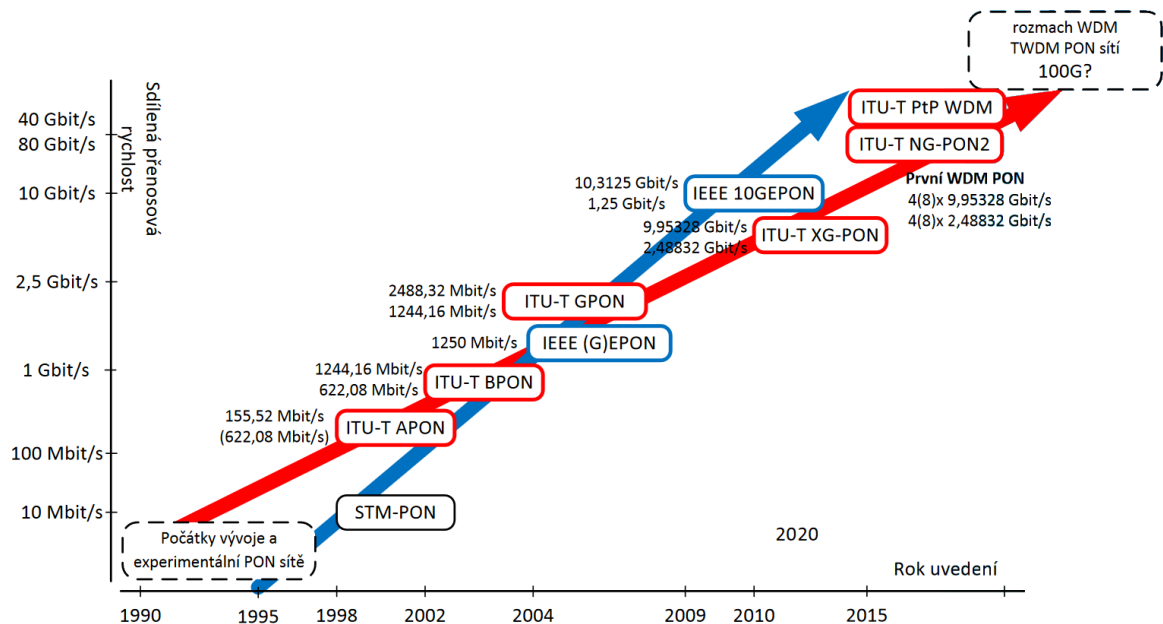
PON sítě jsou definovány pomocí doporučení IEEE i ITU-T. Následující podkapitoly se budou zabývat vlastnostmi jednotlivých technologií a následně jejich porovnáním.

Jako první z technologií používající PON byla roku 1998 představena technologie APON (ATM PON) dle standartu od ITU-T. Tato technologie nesplňuje požadavky pro gigabit-ready technologie, nicméně se z ní vycházelo při navrhování modernějších variant. Další technologií PON byla EPON standardizovaná od IEEE, někdy taktéž nazývána GEPON, aby se zdůraznila přenosová rychlost 1 Gbit/s.

Modernější návrhy PON sítí počítají s rychlostí připojení 10 Gbit, pro doporučení od ITU-T existují potvrzené rychlosti 40 Gbit i 100 Gbit.

Přehled vývoje PON sítí je znázorněn v grafu na obrázku 3.10, který zobrazuje jednot-

livé technologie s danými doporučeními. Na ose X je znázorněno datum představení dané technologie a na ose Y je uvedena maximální přenosová rychlost.



Obrázek 3.10: Porovnání technologií od doporučení od IEEE a ITU-T [31]

Technologie od doporučení IEEE nejsou ve světě natolik rozšířené, jako od ITU-T. EPON byl představen světu v roce 2004, zatímco APON od ITU-T již v roce 1998. GPON byl prezentován roku 2003, a v té době měl lepší vlastnosti ve srovnání s konkurencí od IEEE.

3.3.2 IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

3.3.2.1 Ethernet PON

Ethernet PON (EPON) technologie je definována doporučením IEEE 802.3ah.

EPON (GEAPON - Gigabit EPON) dosahuje rychlosti 1250 Mbit/s symetricky a využívá 2 vlnové délky pro vzestupný a sestupný směr (WDD – Wavelength Division Duplex - Vlnový duplex). Pro vzestupný směr využívá pásmo ve 1260-1360 nm a pro sestupný směr využívá 1480-1500 nm.

Existují 2 typy EPON, první se označuje 1000BASE-PX10 (EPON typ 1) a druhý 1000BASE-PX20 (EPON typ 2). Liší se především v překlenutelné vzdálenosti a ve splitting factoru¹. Typ 1 překlene až 10 km a může se k němu připojit až 16 uživatelů, zatímco typ 2 překlene až 20 km a může se k němu připojit až 32 uživatelů.

Technologie EPON využívá překódování 8b/10b, které výrazně snižuje vlastní užitečnou kapacitu, ubírá 20 % rychlosti mezi fyzickou a spojovou vrstvou, navíc využívá obsáhlé záhlaví v podobě Ethernet rámců.

¹Splitting factor určuje, kolik uživatelů je možné připojit k jednomu vláknu. To znamená, jak moc může být rozděleno jedno vlákno vedené z CO.

3.3.2.2 10 Gigabit EPON

10 Gigabit EPON (10GEPON) technologie je definována doporučením IEEE 802.3av.

10 Gigabit EPON (10GEPON) dosahuje ve variantě 10GBASE-PR rychlosti 10,3 Gbit/s symetricky a ve variantě 10GBASE-PRX dosahuje přenosová rychlost v sestupném směru 10,3 Gbit/s a ve vzestupném směru 1,25 Gbit/s (obdobně jako předchozí varianta EPON). Důvodem je možná koexistence společně s EPON v jedné síti. 10GBASE-PRX pásmo vlnových délek pro vzestupní směr je shodné s EPON (1260-1360 nm), zatímco pro 10GBASE-PR je pásmo 1260-1280 nm. Pro oba typy je pásmo vlnových délek pro sestupný směr shodný: 1575-1580 nm. Způsob koexistence s EPON ve směru vzestupném je pomocí TDM a ve směru sestupném pomocí WDM.

Pro oba typy rychlostí existují tři podtypy, které určují maximální překlenutelné útlumy a splitting factor. PR(X)10, PR(X)20 a PR(X)30.

- PR(X)10 dosahuje překlenutelné vzdálenosti do 10 km a splitting factoru 1:16,
- PR(X)20 dosahuje překlenutelné vzdálenosti do 10 km při splitting factoru 1:32 nebo vzdálenost do 20 km při splitting factoru 1:16 a
- PR(X)30 dosahuje překlenutelné vzdálenosti do 20 km a splitting factoru 1:32.

Existují návrhy na dodatečné zavedení splitting factoru 1:64 a 1:128, ale současná verze standartu tento poměr zatím nespecifikuje [38].

3.3.3 ITU-T - International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector

3.3.3.1 Gigabit PON

Gigabit PON (GPON) technologie je definována doporučením G.984.

GPON dosahuje rychlosti až 2,5 Gbit/s symetricky, může být použita jedno nebo dvou vláknová komunikace. Při použití jednovláknové komunikace jsou využita pásma vlnových délek pro vzestupný směr 1260-1360 nm (s příchodem varianty XG-PON bylo dodatečně upraveno na 1290-1330 nm a po příchodu varianty XGS-PON byla finálně definována na 1300-1320 nm) a pro sestupný směr 1480-1500 nm. Pro použití dvouvláknové komunikace se používá pouze pásmo 1260-1360 nm pro oba směry.

Technologie GPON používá 3 útlumové třídy: A, B a C. Jednotlivé třídy se od sebe liší rozsahem o 5 dB. Maximální fyzický dosah je 20 km, ale logický dosah je navržen až do 60 km. Tento logický dosah je dosažitelný pomocí GPON s prodlouženým dosahem (GPON+) použitým pro třídy B+ (max 40 km, rozdílová vzdálenost max 40 km) a C+ (max 60 km, rozdílová vzdálenost max 40 km). Pro všechny třídy platí splitting factor 1:64 s možností rozšíření na 1:128.

V technologické rozvaze Číny byla vybrána technologie GPON. GPON oproti EPON dosahuje vyšších přenosových rychlostí, větších překlenutelných vzdáleností a vyššího splitting factoru. V důsledku této volby byla technologie GPON dostupnější než EPON a je po světě více rozšířená. V dnešní době je možné technologii EPON zakoupit levněji oproti GPON, ale kvůli jejím vlastnostem není příliš využívána.

3.3.3.2 X Gigabit-PON

X Gigabit-PON (XG-PON) technologie je definována doporučením G.987.

Při výzkumu XG-PON byly vytvořeny dvě pracovní skupiny. Jedna se zaměřovala na vytvoření sítí PON se zachováním zpětné kompatibility se sítěmi GPON. Tato skupina se jmenovala NG-PON1 (Next Generation - PON). Druhá skupina, NG-PON2, se zabývala vývojem bez zachování zpětné kompatibility, tudíž využila TWDM (Time Wavelength Division Multiplex – kombinace vlnového i časového multiplexování). Technologie, kterou vymyslela skupina NG-PON2, je popsána v sekci 3.3.3.3.

Varianta XG-PON1 dosahuje přenosové rychlosti ve vstředném směru 2,5 Gbit/s a v sestupném směru 9,95 Gbit/s. Varianta XG-PON2 dosahuje rychlosti 9,95 Gbit/s symetricky. Pásma vlnových délek obou variant jsou shodná: pro vstředný směr jsou použity vlnové délky 1260-1280 nm a pro sestupný směr 1575-1580 nm. Pro koexistenci se sítěmi GPON je použito odlišné pásmo vlnových délek.

Technologie XG-PON používá 4 útlumové třídy (Nominal 1 a 2, Extended 1 a 2), které kombinují fyzický dosah na 20 km a 40 km. Pro využití vzdáleností až 60 km existuje varianta s prodlouženým dosahem (stejně jako pro GPON síť). Splitting factor je podle doporučení stále nastaven na 64, ale s adresací se již počítá až s 256 koncovými uživateli.

Symetrická X Gigabit PON

Symetrická X Gigabit PON (XGS-PON) technologie je definována doporučením G.9807.

XGS-PON vychází z předchozí sítě XG-PON, rozdíl je ve využití pásem vlnových délek, které je shodné s GPON sítěmi a přenosová rychlost dosahuje 9,95 Gbit/s symetricky. Důvodem je přechod některých operátorů z GPON na XG-PON a tím uvolnili pásma vyhrazená pro technologii GPON a tyto síť je znovu využívají.

Doporučení G.9807.1 umožňuje řadu scénářů koexistence a migrace z předchozích PON sítí starších generací. [38] Podporuje tedy koexistenci se sítěmi GPON, XG-PON a dokonce i s 10GEPON.

3.3.3.3 Next Generation-PON2

Next Generation-PON2 (NG-PON2) technologie je definována doporučením G.989.

NG-PON2 dosahuje přenosové rychlosti až 9,95 Gbit/s symetricky, lze však nastavit na rychlost 2,5 Gbit/s pro jednu vlnovou délku. K navýšení se používají kapacity až 8 vlnových délek. To znamená, že systém může dosahovat až cca 80 Gbit/s. Technologie NG-PON2 používá pásma vlnových délek pro vstředný směr 1524-1534 nm a pro sestupný 1596-1603 nm.

Maximální fyzický dosah je 40 km a logický 60 km. Maximální splitting factor není v doporučení definován, s ohledem na útlumové třídy se předpokládá, že může být použit až 1:256.

Velkou změnou je možnost použití PtP WDM PON, kdy se použije obdobná topologie sítím PON, a pro jednotlivé koncové stanice je pro posílání informace použita jiná vlnová délka. Je zde tedy fyzické oddělení distribuovaného provozu (WDM): každé ONU má filtr pro propuštění dané vlnové délky, a tak se signál pro cizí ONU nedostane k ostatním, jako je tomu např. u GPON (TDM).

3.3.4 FSO - Free Space Optic

Komunikace pomocí FSO (Free Space Optical communication - optická komunikace volným prostorem) funguje podobným principem, jako vláknová optika. Rozdíl je v médiu, které přenáší optický signál. V této variantě se jedná o přenos volným prostorem stejně jako u rádiového spoje. Oproti rádiovému spoji je FSO náchylnější na různé drobné částice, počínaje prachem, přes déšť, až po mlhu. Tyto atmosférické jevy velice negativně ovlivňují kvalitu spoje a útlum může přesahovat 100 dB/km. Pro FSO jsou použity tyto vlnové délky: 850 nm, 1060 nm, 1250 nm a 1550 nm. V těchto pásmech je atmosféra skoro transparentní (útlum zde dosahuje méně jak 0,2 dB/km) kromě oblasti okolo 1290 nm, kde je vlnová délka absorbována ionty OH^- . Narozdíl od optických vláken se nedá v přenosovém médiu (atmosféře) vytvořit prostředí bez těchto iontů.

Typické překlenutelné vzdálenosti jsou pro FSO spoje okolo 300 m až 5 km. Spoje s delší vzdáleností mohou dosahovat až 11 km [1], maximální vzdálenost spoje závisí na maximální přenosové rychlosti a požadované stabilitě spoje. S větší vzdáleností klesají hodnoty těchto parametrů. V dnešní době jeden spoj může dosahovat rychlosti přibližně 30 Gbit/s. Jelikož se jedná o komunikaci laserovým paprskem, spoj je velice náchylný k odklonění jedné stanice vůči druhé (jedná se o maximální vychýlení okolo 65 mrad ($3,7^\circ$)). Tyto systémy jsou vybaveny prostorovou stabilizací, která umožňuje udržet spoj vychýlený $\pm 0,05$ mrad.

FSO spoje jsou pouze typu PtP. Jejich výhodou je vysoce kapacitní spoj s možností navázání přijímaného signálu do vlákna a vedení tohoto signálu přímo do aktivní technologie. Nevýhodou je vysoká citlivost na atmosférické jevy (mraky, mlha, déšť, kouř, změny teploty a další), které negativně ovlivňují kvalitu signálu a mohou zapříčinit úplnou ztrátu signálu.

3.4 Hybridní přístupová síť

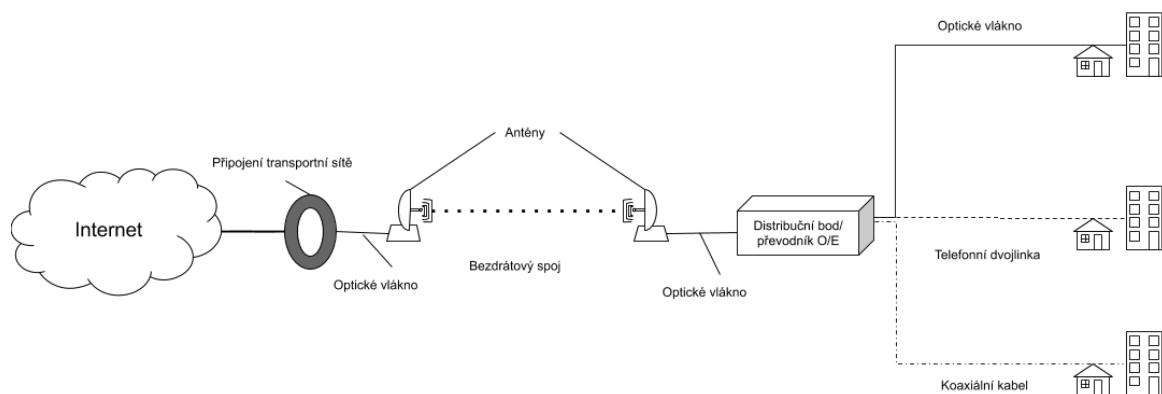
Hybridní přístupové sítě jsou tvořeny kombinací výše uvedených „čistých“ přístupových sítí. Kombinace, které zde budou popsány jsou:

- bezdrátovo - optická,
- bezdrátovo - metalická,
- opticko - metalická.

Mohou existovat i cesty, které využívají všechny typy přístupových sítí, ty jsou ale použité velmi výjimečně. Ideálním řešením pro přístupové sítě je technologie jednoho typu. V současné době je ideální využívat v co největší možné míře optická vlákna, kvůli jejich necitlivosti k vnějšímu elektromagnetickému rušení a vysoké možné přenosové rychlosti. Protože náklady na vybudování optické infrastruktury jsou vysoké, měly by být jako dočasné řešení postaveny bezdrátové spoje, které zastoupí funkci připojení do doby, než se podaří k místu napojení připojit optickou přípojku.

Často se také řeší situace, kde se může využít stávající metalická infrastruktura v dostatečně krátké vzdálenosti, aby mohly dané technologie distribuovat dostatečně velký provoz.

Schématické zapojení využívající v první části trasy bezdrátový spoj je zobrazeno na obrázku 3.11.



Obrázek 3.11: Hybridní přístupové sítě využívající v první části bezdrátový spoj

Připojení hybridní přístupové sítě, která využívá v první části optický kabel je zobrazena na části obrázku 3.1. Týká se to především technologií FTTB, FTTC a FTTdp, viz následující kapitoly.

3.4.1 Bezdrátovo - optická přístupová síť

Jako první kategorii si představíme situaci, kdy v BD jsou již připraveny optické domovní rozvody, které je potřeba připojit k internetu. Toto řešení má podobný název jako FTTH – WTTH (Wireless To The Home).

3.4.1.1 WTTH - Wireless To The Home

Princip WTTH je připojení BD z místa, ze kterého je přiveden optický kabel z transportní sítě tak, aby umožnil přenos velkého objemu dat. Z tohoto místa se vhodnou bezdrátovou technologií (často používaný E-band) připojí BD, která má přenosovou rychlost alespoň 1 Gbit/s. Na střeše nebo v podkroví BD je vybudována technická místnost pro připojení bezdrátové přístupové sítě k vnitřním optickým rozvodům. Zde může být využita technologie GPON pro distribuci internetu po domovních rozvodech až k účastnické zásuvce.

3.4.2 Bezdrátovo - metalická přístupová síť

Podobný princip, jako byl u bezdrátovo - optické přístupové sítě, je u bezdrátovo - metalické přístupové sítě. Narozdíl od WTTH je FWA (Fixed Wireless Access - Fixní bezdrátová přístupová síť) připojena na metalické vnitřní domovní rozvody.

3.4.2.1 FWA – Fixed Wireless Access

První část připojení je stejná jako u WTTH, bezdrátovou technologií se dovede připojení k internetu do aktivní technologie ONU (distribuční bod), která bude dále distribuovat internet pomocí metalických kabelů. ONU je použito v technologii GPON, lze použít připojení přes metalické kabely pomocí G.fast, případně G.mgfast.

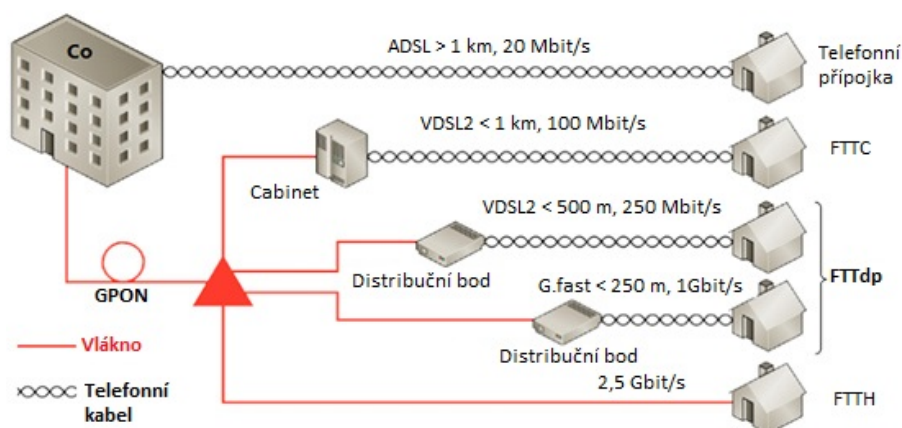
Pro připojení zákazníků, kteří požadují vyšší přenosové rychlosti, je potřeba, aby měl daný bezdrátový spoj dostatečnou kapacitu tuto poptávku zajistit. Nemůže se tedy počítat s tím, že BD bude připojený nedostatečnou kapacitou (například 100 Mbit/s obousměrně) a nabízet tuto rychlost všem zákazníkům (i kdyby bylo zákazníků v řádu jednotek). Tuto poptávku by tímto nebyl poskytovatel schopen pokrýt, tudíž je potřeba, aby přírodní kapacita bezdrátového spoje byla vždy dostatečná. Proto je nezbytné mít přírodní spoj s přenosovou rychlostí vyšší než 1 Gbit/s, aby bylo možné připojit větší množství zákazníků. Pro velké bytové domy je zapotřebí dovést ještě vyšší kapacitu.

3.4.3 Opticko - metalická přístupová síť

Jedno z nejvíce se rozšiřujících odvětví od vydání výzvy NGA (2015) pro navýšení přenosové rychlosti u zákazníků je využití metalické infrastruktury s přírodním optickým vláknem pro snížení celkové vzdálenosti přenosu informace po metalické síti. Využívá především současné metalické rozvody, ať už se jedná o vnitřní domovní rozvody, anebo přístupovou síť.

Z historického hlediska byly v České republice zaváděny telefonní kabely do všech domácností, aby byla možnost zřízení telefonní přípojky. Tyto telefonní kabely jsou nyní kvůli své délce, kterou překonávaly k telefonním ústřednám, z hlediska přenosové kapacity velice nevhodné. Jak již bylo v dřívějších kapitolách o technologiích pracujících na metalických kabelech (kapitola 3.1) zmíněno, z důvodu vysokého útlumu na velkých vzdálenostech v metalických kabelech není možné dosáhnout vysoké rychlosti již po několika stovkách metrů. Na tyto vzdálenosti byla schopná komunikovat technologie ADSL, která je z pohledu NGA (natož VHCN) značně nedostačující.

Rozdíl mezi technologiemi bývá častokrát uveden ve vzdálenosti přípojného bodu od optiky k napojovanému objektu po metalickém kabelu. Pokud se jedná o vzdálenost menší než jeden kilometr, jedná se o FTTC, jestli je vzdálenost menší než 500 m, jedná se o FTTdb, kde přenosovou technologií bývá VDSL2 a u vzdálenosti menší než 250 m může být jako přenosová technologie využita G.fast. V okamžiku, kdy je DP uvnitř budovy, se jedná o FTTB. Tato rozdělení jsou zobrazena na obrázku 3.12.



Obrázek 3.12: Rozdělení hybridních přístupových sítí využívající přírodní optický kabel [44]

3.4.3.1 FTTC - Fiber to the Cabinet

Pro zvýšení přenosové kapacity metalických kabelů je nezbytné zkrátit nutnou délku, kterou musí data po metalickém kabelu překonat. To se realizuje pomocí technologie DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer). Jedná se o aktivní technologii, která převádí z optické přístupové sítě data k jednotlivým uživatelům, kteří jsou do tohoto zařízení napojeni pomocí telefonních kabelů. DSLAM je umístěn především v ústřednách a v traťových rozvaděčích (TR), které jsou realizovány v místnostech budov nebo samostatných objektech. Zmíněná technologie je umístěna v racku.

V případě, kdy je potřeba zkrátit délku metalických kabelů ještě více se používá rDSLAM, který využívá velikosti obdobné metalickým síťovým rozvaděčům (SR). rDSLAM využívá venkovní rozvaděč² o rozměrech přibližně 1200 x 550 x 250 mm, které odpovídají stávajícím SR a není tedy potřeba vyřizovat územní rozhodnutí (ÚR) pro nové umístění skříně, pouze se vymění za starou. To je ohromná výhoda této technologie, která má za následek zvýšení rychlosti výstavby.

V případě blízkého umístění skříně je možné použít technologii VDSL2 pro distribuci přenosové rychlosti až 250 Mbit/s. Díky těmto „předsunutým jednotkám“ lze zajistit širší veřejnosti vysokorychlostní internetovou přípojku bez provedení množství výkopů, které by byly potřebné k vytvoření optické sítě typu FTTH.

3.4.3.2 FTTdp - Fiber to the Distribution Point

Přivedení vlákna k distribučnímu bodu je typ přístupové sítě, který je mezi FTTC a FTTB. Jedná se o místo, kde dochází k „předání“ datového provozu z optického vlákna na jiný typ média (metalický kabel, bezdrátový spoj) pro zkrácení vzdálenosti, snížení útlumů a rušení, a tím navýšení kapacity druhé části přístupové sítě.

Je zde znatelná výhoda oproti FTTC ve snížení tzv. „poslední míle“, která bývá nejčastěji úzkým hrdlem pro vysoké přenosové rychlosti. Při zkrácení poslední míle dochází ke snížení útlumu, a tím k navýšení přenosové rychlosti při využití vhodné technologie.

3.4.3.3 FTTB - Fiber to the Building

Hybridní technologií, která využívá v největší míře optický kabel je FTTB. Nejčastěji se využívá v budovách, které již mají stávající metalické vnitřní domovní rozvody, které se mohou použít pro vedení datových přenosů. Bývají zde nejkratší délky metalických kabelů, proto může být využita technologie G.fast (G.mgfast), která distribuuje internet uvnitř budovy do jednotlivých bytů.

Toto řešení většinou bývá použito při realizaci vnitřních rozvodů v historických budovách, které mají rozvody metalické, a jejichž majitelé či vlastníci odmítají realizaci optických vnitřních rozvodů. V tomto případě je optický kabel přiveden z vnějšího prostředí do technické místnosti (např. ve sklepech) a zde jsou napojeny stávající vnitřní rozvody.

²převzato z internetových stránek firmy MICOS [<https://www.micostelcom.cz/rdslam>] citováno dne 19.3.2020

3.5 Porovnání technických parametrů

Každá z výše uvedených technologií má různé parametry. V této kapitole jsou shrnuty parametry podstatné pro technické porovnání technologií k použití v atrakčních lokalitách. Porovnávány jsou: přenosová rychlost ve směru downlink a uplink, maximální možný (doporučený) dosah technologie a maximální dosah pro maximální rychlosti.

Technologie	Přenosová kapacita (<i>downstream</i>)	Přenosová kapacita (<i>upstream</i>)	Maximální překlenutelná vzdálenost	Dosah pro maximální propustnost
Metalické technologie				
VDSL2	až 260 Mbit/s	až 160 Mbit/s	1,5 km	200 m
G.fast	až 2,5 Gbit/s	až 2,5 Gbit/s	400 m	100 m
G.mgfast	až 10 Gbit/s	až 10 Gbit/s	100 m	40 m
DOCSIS 3.1	až 10 Gbit/s	až 1 Gbit/s	–	–
Bezdrátové technologie				
IEEE 802.11ac SISO, 80 MHz MIMO 8x8, 160 MHz	až 0,5 Gbit/s ³ až 6,5 Gbit/s ³	až 0,5 Gbit/s ³ až 6,5 Gbit/s ³	12 km	70 m
WiGig	až 6,75 Gbit/s ³	až 6,75 Gbit/s ³	2 až 3 km	10 m
E – Band	až 3 Gbit/s	až 3 Gbit/s	20 km	1 km
LTE	až 300 Mbit/s	až 300 Mbit/s	30 km	300 m
LTE-A	až 3 Gbit/s	až 3 Gbit/s	35 km	300 m
satelit	až 1 Gbit/s	až 1 Gbit/s	6000 km	100 km
Optické technologie				
GPON A	až 2,5 Gbit/s	až 1,25 Gbit/s	20 km	20 km
GPON C+	až 2,5 Gbit/s	až 1,25 Gbit/s	60 km	40 km
EPON typ 1	až 1,25 Gbit/s	až 1,25 Gbit/s	10 km	10 km
EPON typ 2	až 1,25 Gbit/s	až 1,25 Gbit/s	20 km	10 km
10GEPON	až 10 Gbit/s	až 10 Gbit/s	20 km	10 km
XG-PON	až 12,5 Gbit/s	až 2,5 Gbit/s	60 km	40 km
XGS-PON	až 10 Gbit/s	až 10 Gbit/s	60 km	40 km
NG PON2	až 80 Gbit/s	až 80 Gbit/s	60 km	40 km
FSO	až 30 Gbit/s	až 30 Gbit/s	7 km	1500 m

Tabulka 3.1: Porovnání technických parametrů pro technologie VHCN

Kromě technologií G.fast, G.mgfast, WiFi SISO, E–Band a FSO, které používají čistě PtP spojení, se jedná o technologie s možností PtP i PtMP spojení. V případě PtMP se jedná o sdílenou kapacitu přenosové rychlosti mezi všemi připojenými uživateli. V případě PtP se jedná o vyhrazený kanál pro jednoho uživatele a přenosovou kapacitu nesdílí s ostatními účastníky. Může však dojít k poklesu přenosové rychlosti ze strany přípojné sítě (uplink aktivní technologie), kterou může zaznamenat i uživatel, který je připojen typem PtP.

³Využívá sdílenou kapacitu mezi oběma směry přenosu

Kapitola 4

Měření

Pro upřesnění výsledků určených k porovnání je využito fyzické měření technologií v technické části metrik. Pro bezdrátovou technologii byl vybrán 60 GHz spoj, pro optickou technologii byl vybrán GPON.

Účelem měření je zjistit reálné parametry, které se mohou lišit od parametrů uváděných. Stěžejními parametry jsou:

- přenosová rychlost,
- ztrátovost,
- zpoždění RTT a
- závislost na počasí.

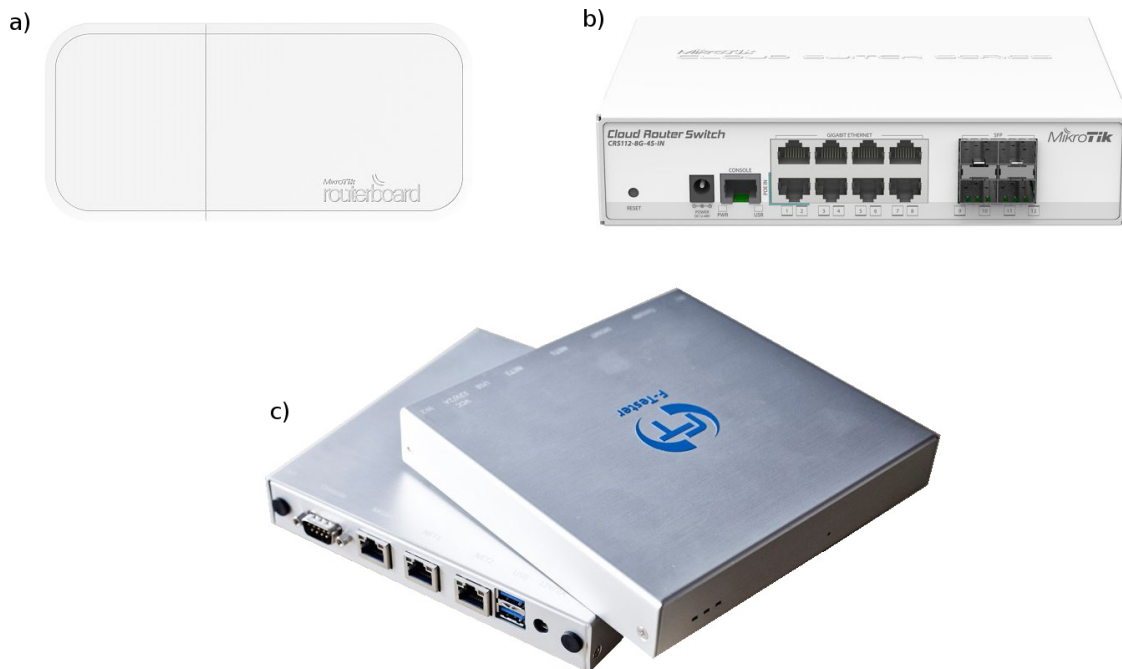
Dalšími parametry jsou například: jitter (kolísání zpoždění), maximální dosah pro spolehlivý spoj, maximální dosah pro zachování nejvyšší rychlosti nebo PMTU (Path Maximum Transmission Unit – maximální velikost přenosové jednotky na trase).

4.1 Měření parametrů 60 GHz PtP spoje

Pro měření na 60 GHz spoji byly použity následující přístroje:

- access point (AP) – MikroTik wAPG-60ad AP,
- router – MikroTik CRS112-8G-4S-IN,
- měřící zařízení – F-Tester.

Na obrázku 4.1 jsou znázorněny komponenty použité pro měření PtP spoje komunikujícího pod standardem IEEE 802.11ad (WiGig).



Obrázek 4.1: Zařízení použitá v měřicí sestavě ve frekvenčním pásmu 60 GHz: a) MikroTik wAPG-60ad AP [35], b) MikroTik CRS112-8G-4S-IN [34] a c) F-Tester [19]

Access point – MikroTik wAPG-60ad AP

Jako AP byly použity 2 vysílače od firmy MikroTik pro 60 GHz – pásmo definované standardem IEEE 802.11ad. AP jsou typu PtMP s vyzářovacím úhlem 60° a hodnotou EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power – ekvivalentní izotropně vyzářený výkon) menší než 40 dBm.

AP v sobě mají zabudovanou síťovou kartu 10/100/1000 Mbit/s. Je tedy zřejmé, že mohou komunikovat maximální rychlostí 1 Gbit/s na fyzické vrstvě. Tento typ AP má doporučenou maximální vzdálenost spoje přibližně 200 m pro využití rychlosti až 1000 Mbit/s full-duplex. wAPG-60ad má možnost připojení až 8 CPE (Customer-premises equipment – účastnická sada) současně.

V rámci měření používaly AP MCS (Modulation and Coding Schemes – modulační a kódová schémata) do hodnoty 8, která odpovídá přenosové kapacitě kanálu na fyzické vrstvě přibližně 2,3 Gbit/s (viz tabulka B.1). Hodnoty MCS byly při měření využity mezi 4 a 8, v závislosti na zvoleném vysílacím výkonu AP. Je to kvůli tomu, že AP upravují svůj vysílací výkon automaticky v závislosti na kvalitě přijímaného signálu. Tato skutečnost byla zřetelná, když AP nevysílaly zbytečně silný výkon pro dosažení 100 % možné kapacity přenosu. Vysílací úrovně byly dostačující pro bezchybný provoz a pro potřebnou přenosovou rychlost (přibližně 80 % maximální hodnoty), která je stanovena síťovou kartou (jak bylo zmíněno výše, 1 Gbit/s).

Router – MikroTik CRS112-8G-4S-IN

Pro připojení do místní sítě bylo použito zařízení Cloud Router Switch od firmy MikroTik, model CRS112-8G-4S-IN. Označení *8G* a *4S* znamená, že zařízení obsahuje 8 gigabitových Ethernetových portů o rychlostech 1 Gbit/s a 4 šachty pro SFP moduly¹.

Pro měření byly použity 2 GE (Gigabit Ethernet) porty. Jeden port byl použit pro připojení do LAN a druhý port pro připojení F-Testeru přes port **MGMT**.

Na zařízení je možné nastavit VPN (Virtual Private Network - Virtuální Privátní Síť) server pro možný vzdálený přístup do měřicí sítě.

Měřicí zařízení – F-Tester

F-Tester je zařízení vyvinuté na ČVUT FEL, katedře telekomunikační techniky, pro měření parametrů NGA sítí. Obsahuje 2 typy portů. První je značený **MGMT** a pracuje jako dohledové rozhraní, druhý typ je **NET** a jedná se o datové rozhraní.

Rozhraní **MGMT** slouží pro použití webové aplikace pro management a pro připojení pomocí SSH² (Secure Shell) protokolu. Zde probíhá nastavování měřících schémat, která jsou definována pro měřicí aplikace a mohou být upravena pro specifické požadavky daného měření.

Měřicí část pracuje na dvou portech označených **NET**, který pracují jako datové rozhraní v režimu síťový most. Oba porty mají rozhraní GE, tzn. může dosahovat rychlostí 1 Gbit/s s nastavením full duplexního přenosu.

F-Tester měří data na L4 vrstvě ISO modelu. Údaje z měření neodpovídají hodnotám na fyzické vrstvě, které jsou uváděné například na síťové kartě (10/100/1000 Mbit/s), ale jsou zmenšená o hlavičky paketů, které jsou odebrány na nižších vrstvách přenosového ISO modelu.

Pro hlavní měření byl použit měřicí scénář s IPerf využívající protokol TCP. Struktura uložených dat z měření byla: typ protokolu (TCP/UDP), začátek měření [s], konec měření [s], délka měření [s], velikost přenesených dat [Byty], propustnost [bit/s], počet přeposlaných paketů [ks], velikost CWND (Congestion Window – okno přetížení) [kByte], zpoždění RTT (Round Trip Time – zpoždění ve smyčce) [ms], RTTvar (rozptyl RTT – jitter) [ms], velikost PMTU [Byty] a zda byla strana vysílací nebo přijímací (upstream/downstream). Hlavními parametry jsou propustnost, počet přeposílání a RTT.

Zapojení měřicí sestavy

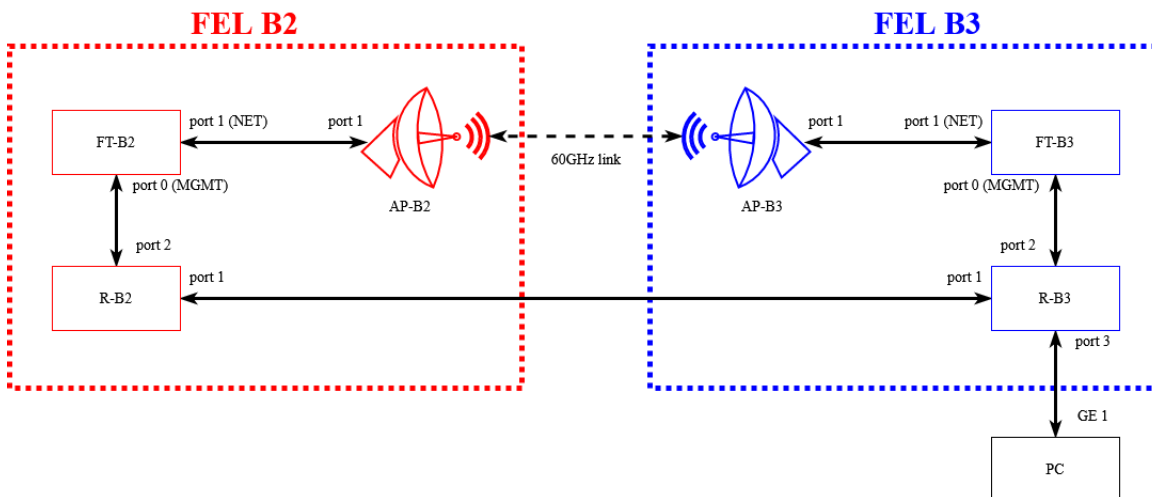
Na obrázku 4.2 je znázorněno schéma zapojení sestavy pro měření. Sestava byla umístěna na střeše budovy ČVUT FEL, na blocích B2 a B3. Jako AP (AP-Bx) byly použity 2 PtMP AP od firmy MikroTik, model wAP-60ad [35], pracující pod standardem IEEE 802.11ad. AP byly zapojeny do měřicí jednoty F-Tester [19] (FT-Bx) přes **NET** rozhraní, na kterém se prováděla měření. F-Tester byl zapojen přes port **MGMT** do routeru Cloud Router Switch (R-Bx) od firmy MikroTik, model CRS112-8G-4S-IN, který propojoval sestavu skrz interní síť fakulty.

¹SFP modul (Small Form-factor Pluggable) je technický standard vložných vysílačů vybavený optickými i metalickými rozhraními. Obsahuje několik možností rychlostí, kvůli této vlastnosti je zajištěna modularita.

²Secure Shell je zabezpečený komunikační protokol v počítačových sítích, který používá TCP/IP.

Na routeru R-B3 byl zprovozněný VPN server, ke kterému byla možnost vzdáleného připojení z VPN klienta na PC.

Všechna zařízení obsahují rozhraní síťových karet 10/100/1000 Mbit/s. Sestava tedy nebyla rychlostně omezena prvkem, který by neměl dostatečnou přenosovou rychlost a nikde nevznikalo tzv. „úzké hrdlo“.



Obrázek 4.2: Schéma zapojení měřicí sestavy v pásmu 60 GHz

Pro vzdálený přístup k měřicí sestavě bylo potřeba vytvořit VPN tunel, kterým se připojí do rozhraní R-B3, které přesměruje provoz do sítě vytvořené pro měřicí sestavu. Z tohoto bodu byl možný přístup k rozhraním všech prvků. Pro zjištění údajů a parametrů AP bylo potřeba připojení přes SSH protokol do rozhraní FT-B3 nebo B2, na základě toho, ke které z AP bylo potřeba se připojit.

V případě připojení k 60GHz-B3 bylo potřeba se připojit do FT-B3 pomocí SSH a dále se připojit pomocí SSH do dané AP přes rozhraní F-Testeru.

Pro připojení do dohledového rozhraní nebylo nutné připojení přes SSH, ale bylo dostačující přes internetový prohlížeč. Po zadání IP adresy, na které běžela webová aplikace, se zobrazila úvodní stránka F-Testeru (zobrazeno na obrázku 4.3).

V hlavní nabídce webové aplikace byl zobrazený aktuální stav F-Testeru. Na obrázku 4.4 je zobrazeno webové rozhraní v režimu měření. V obrázku je informace, jak dlouho bude spuštěné měření probíhat a jaká měření jsou ve frontě (včetně aktuálně měřeného).

The screenshot shows the F-Tester web interface. At the top, there is a navigation bar with the logo and menu items: Home, Start Test, Results, NGA Profile, and Custom Scenarios. On the right of the navigation bar, there is an 'AUTO REFRESH ON' button. The main content area is divided into two sections: 'Current status:' which shows 'IDLE' in a green box, and 'Scheduled operations:' which states 'There are no scheduled tests.' Below these sections are two buttons: 'Start a New Test' with a play icon and 'Show Results' with a line graph icon. At the bottom left, there is copyright information: '© Czech Technical University in Prague, FEE, Department of Telecommunication Engineering - f-tester.fel.cvut.cz' and 'F-Tester OS 1G Release, Device ID: 1253429'. At the bottom right, there are links for 'Administration' and 'F-Tester'. The status is updated at 12:34:39 with 219 GB free space.

Obrázek 4.3: Úvodní obrazovka webového rozhraní F-Testeru

The screenshot shows the F-Tester web interface during a test. The 'Current status:' section shows 'RUNNING' in a blue box. Below it, the test progress is shown as 'running' and 'Remaining: 2 hours 12 minutes 17 seconds'. The 'Scheduled operations:' section contains a table with one entry:

Type	Duration	Start Time	Action
DIP_12h_iperf_3streamy_UP	13 hours 12 minutes	00:00:00	CANCEL

At the bottom right, the status is updated at 10:59:43 with 219 GB free space.

Obrázek 4.4: Ukázka aktuálního stavu F-Testeru během měření

Záložka **Home** přejde na úvodní stránku zobrazenou na obrázku 4.3. Záložka **Start Test** přejde na stránku, ve které se volí, jaký scénář bude vybrán (buďto scénář NGA nebo vlastní definovaný, např. pro účely měření v této práci typu IPerf), a kdy bude měřicí scénář zahájen (od okamžiku stisknutí tlačítka Start nebo v předem nastavený čas). Záložka **Results** obsahuje všechny měřené scénáře a jejich výsledky, včetně měření, která selhala i měření, které právě probíhá. V této záložce je možné stáhnout výsledky a zpracovávat údaje z měření. O informaci z měření pojednává sekce 4.1.2 [Naměřené parametry](#).

Záložka **NGA Profile** umožňuje nastavení limitů pro NGA scénáře měření, které v této měřicí úloze nebyly využity. Pro účely měření byla využita především záložka **Custom Scenarios**, ve které byly definovány vlastní scénáře měření. Bylo zde možné definovat testovací profily, které se skládají do profilů scénářů. Tato sekce sloužila především k jejich vytváření a úpravám.

Parametry	Hodnoty
frekvence:	58 320 MHz
tx-mcs:	8
tx-phy-rate:	2,3 Gbps
signal:	80 %
rssi:	-59 dBm
distance:	51,12 m
tx-packet-error-rate:	0 %

Tabulka 4.1: Výpis z parametrů AP ze vzdáleného přístupu

V zapojení zobrazeném na obrázku 4.2 bylo prováděno měření pro zjištění stability a stálosti spojení při rozmanitosti počasí. Testovalo se, zda je bezdrátový spoj spolehlivý i v nepříznivém počasí (děšť, mlha).

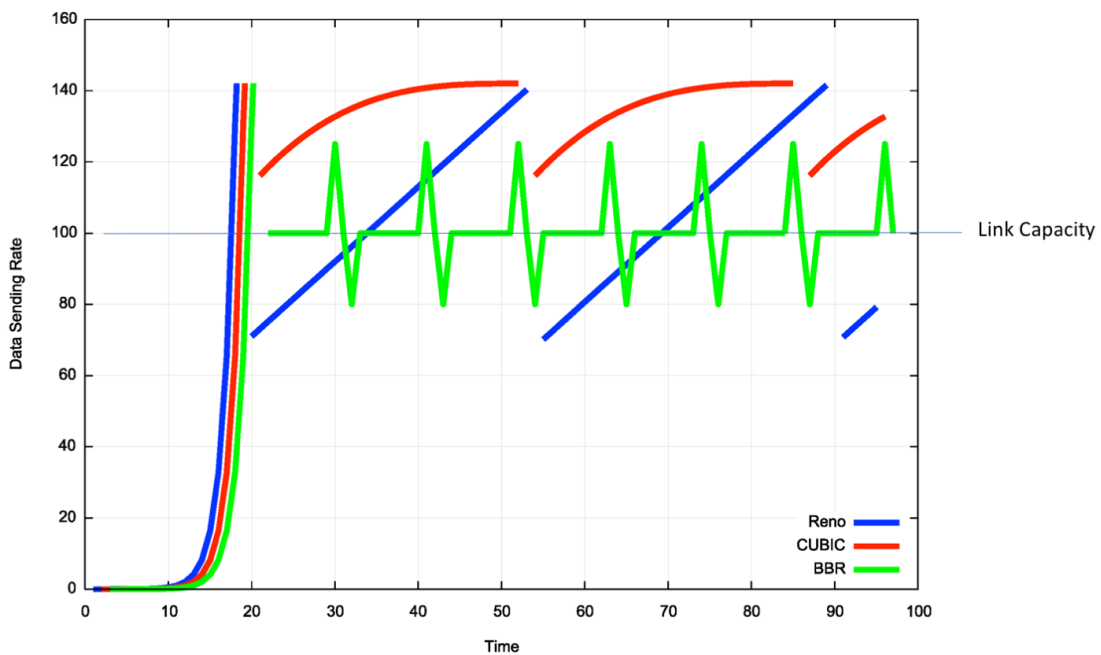
V tabulce 4.1 jsou uvedeny parametry jedné z AP.

- **Frekvence** je údaj, který kanál je použit. V tomto případě je použit první kanál, který má střed pásma s frekvencí 58 320 MHz s šířkou pásma 2,16 GHz.
- **Tx-mcs** je hodnota MCS, v tomto případě je to 8, které odpovídá tx-phy-rate (vysílací přenosová rychlost na fyzické vrstvě) o hodnotě 2,3 Gbit/s.
- **Signal** je SQI (Signal Quality Index), který udává poměr, jak je přijímaná informace kvalitní. Je vyjádřen v procentech.
- **RSSI** (Received Signal Strength Indication – indikace síly přijímaného signálu) je hodnota kvality přijímaného signálu, který je hlavním údajem pro zjištění třídy MCS a určení správného schématu pro využití co nejvyšší přenosové rychlosti pro danou sílu signálu.
- **Distance** je vzdálenost mezi AP. V tomto případě jsou od sebe AP vzdáleny 51,12 m.
- **Tx-packet-error-rate** je aktuální procentuální hodnota vyjadřující kolik z přijatých paketů bylo přijato špatně a nebyly opraveny – chybovost. Tato hodnota byla velice nestálá a objevovaly se zde hodnoty blížící se ke 100 %, tedy velmi chybové sekundě.

4.1.1 Měřicí algoritmy IPerf

Pro účely měření bylo potřeba dlouhodobé trvání testů. Použity byly především hodinové úseky, ve kterých probíhalo testování parametrů. Jako měřicí nástroj byl použit IPerf s přenosem dat pomocí protokolu TCP. Pro porovnání byly vybrány 3 algoritmy, které IPerf využívá: **Cubic**, **Reno** a **BRR**.

Zásadní rozdíl mezi těmito algoritmy je v řešení *congestion avoidance* - vyhýbání se zahlcení sítě, které je zobrazeno na obrázku 4.5. **Reno** je z těchto algoritmů nejstarší, algoritmus **BRR** je naopak nejmladší.



Obrázek 4.5: Zobrazení průběhů vyhýbání se zahlcení sítě pro algoritmy IPerf [23]

Algoritmus **Reno** využívá pro zjištění zahlcení linky chybovost následovně: pokud přijme více než 3 duplicitní ACK (Acknowledgement – potvrzení), zahájí rychlé přeposílání a sníží svoji přenosovou rychlost na polovinu pro zotavení, kdy přeskočí fázi „pomalého startu“. Tato část se nazývá „rychlé zotavení“. Po snížení rychlosti pokračuje opět v navyšování rychlosti přenosu, dokud se scénář neopakuje. Takto posléze osciluje kolem maximální reálné propustnosti. Průběh algoritmu Reno měřený F-Testerem je zobrazen na obrázku C.6 v příloze C.

Algoritmus **Cubic** funguje na principu sledování zpoždění přenosu dat. Jeho použití je vhodné především pro sítě s velkou šířkou přenosového pásma s velkým zpožděním, především pro LFN (Long Fat Network – velké obsáhlé sítě). Měření, které bylo prováděno v rámci této práce pracuje s přenosovou rychlostí 1 Gbit/s a zpožděním větším než 100 μ s, proto se může považovat za LFN. Při vyhodnocení přetížení algoritmem Cubic je nastavena předchozí přenosová rychlost, která byla v minulosti bez přetížení. Od tohoto bodu algoritmus přenosovou rychlost opět navyšuje. Oproti algoritmu Reno u tohoto algoritmu dochází k růstu rychlosti přes průběh kubické funkce. Průběh algoritmu Cubic měřený F-Testerem je zobrazen na obrázku C.7 v příloze C.

Algoritmus **BBR** je z uvedených algoritmů nejmladší a je využíván v sítích s vysokou přenosovou rychlostí s nízkou odezvou. Algoritmus využívá plnou kapacitu přenosového pásma pro přenos dat. Periodicky navyšuje přenosovou rychlost pro rychlé posílání dat v případě, že je naplněna vyrovnávací paměť. Během chvíle sníží přenosovou rychlost pod úroveň maximální přenosové kapacity kanálu a po stejném časovém úseku (jako při navýšení) ustálí přenosovou rychlost na maximální úrovni. V průběhu snížení rychlosti je vytvořen prostor pro přeposílání dat, které byly poškozeny v průběhu přenosu zvýšenou přenosovou rychlostí. Průběh algoritmu BBR měřený F-Testerem je zobrazen na obrázku C.8 v příloze C.

4.1.2 Naměřené parametry

Pro měření parametrů byly použity všechny tři algoritmy IPerf, které byly popsány v předchozí kapitole. Pro relevantní data bylo měření provedeno každým algoritmem třikrát po dobu jedné hodiny pro každý test a tyto hodnoty byly zprůměrovány. Měřeny byly především: přenosové rychlosti, zpoždění a počty přeposlání. Pro tato měření byl využit jeden směr přenosu - upstream. Ve směru upstream byly zaznamenány v měření hodnoty přeposlání i zpoždění RTT, tyto parametry však nebyly zaznamenány ve směru downstream (byly zde měřeny parametry propustnosti, velikosti přenesených dat a času).

Přímé natočení AP

V první variantě bylo použito přímé natočení AP – středy vyzařovacích charakteristik jsou v ose spoje. Fotografie natočení je zobrazena na obrázku C.9.

V tomto případě byl přenos dostatečně kapacitní, aby nedocházelo ke ztrátám či chybovosti přenosu, a nebylo v měření zaznamenáno žádné přeposlání. Proto jsou v porovnávací tabulce uvedeny pouze dva zbylé parametry.

Algoritmus	Přenosová rychlost [Mbit/s]	zpoždění RTT [ms]
Reno	939,1	5,7
Cubic	939,1	5,8
BRR	906,6	2,1

Tabulka 4.2: Průměrné hodnoty měřených parametrů pomocí algoritmů IPerf

Z naměřených parametrů je zřetelné, že algoritmus BRR je vhodný pro svoji nízkou hodnotu RTT, ale oproti zbylým algoritmům je jeho přenosová kapacita přibližně o 3,6 % nižší. Algoritmy Reno a Cubic jsou si velmi podobné a využívají vyšší přenosovou rychlost oproti BRR. Z těchto výsledků byl pro měření vybrán algoritmus Cubic, protože má ze všech tří algoritmů nejvyšší přenosovou rychlost.

3 datové toky

Pro další měření bylo použito celkově 6 datových toků symetricky, 3 datové toky ve směru upstream a 3 datové toky ve směru downstream. Pro tento případ již nebyla dostatečná kapacita kanálu a každý datový tok měl drobnou chybovost (přibližně 0,004 %).

Ddatový tok UP/DOWN	Přenosová rychlost [Mbit/s]	Přeposlané pakety - průměr za 1 s	Zpoždění RTT [ms]
UP - 1	335	8,6	8,4
UP - 2	292	8,5	10,6
UP - 3	293	9,7	10,5
UP celkem	920	27	-
DOWN celkem	889	-	-

Tabulka 4.3: Naměřené parametry pro měření využívající celkem 6 datových toků

Z naměřených hodnot je patrné, že v případě měření 6 datových toků docházelo k chybovosti a k přeposílání paketů. Tato skutečnost byla zaznamenána pouze ve směru upstream, kde byla uložena do zařízení, ze kterého byl generován měřený datový tok, a tím se informace o přeposílání uložila. Míra přeposílání byla v průměru přibližně 27 paketů za sekundu při součtu všech tří datových toků. To znamená, že v případě velikosti rámce 1460 bitů (bylo nastaveno v měřícím scénáři) bylo průměrně přeposíláno 39 420 bitů informací za sekundu. To je v případě přenosové rychlosti 920 Mbit/s přibližně 1 špatně přenesený bit na 23 340 přenesených bitů.

Měření při zhoršených atmosférických podmínkách

Pro nastavení sestavy při zhoršených atmosférických podmínkách bylo provedeno měření při silném dešti, který podle předpovědi dosahoval okolo 11 mm srážek za hodinu. Důvodem měření byl předpoklad zhoršení parametrů přenosu. V průběhu měření však navzdory předpokladu ovlivnění parametru ke zhoršení nedošlo.

Tato situace mohla nastat z důvodu krátké vzdálenosti spoje, který je od sebe vzdálený mírně přes 51 metrů, a proto mohly mít AP dostatečnou rezervu pro bezchybný provoz. Aby bylo docíleno zhoršení parametrů spojení, bylo nutné AP vůči sobě směrově odklonit. Protože se jedná o AP s širokým úhlem vyzařování (60°), jedno AP bylo vyoseno přibližně o 80° pro snížení kvality přijímaného signálu. Úprava AP je znázorněna na obrázku C.10.

Vyosené AP

Při odklonu AP došlo ke zhoršení parametrů, které jsou zaznamenány z přímého výstupu v tabulce 4.4.

parametry	přímé	vyosené
signal:	80 %	45 %
rsi:	-59 dBm	-70 dBm
distance:	51,12 m	51,18 m
tx-packet-error-rate:	0 %	5 %

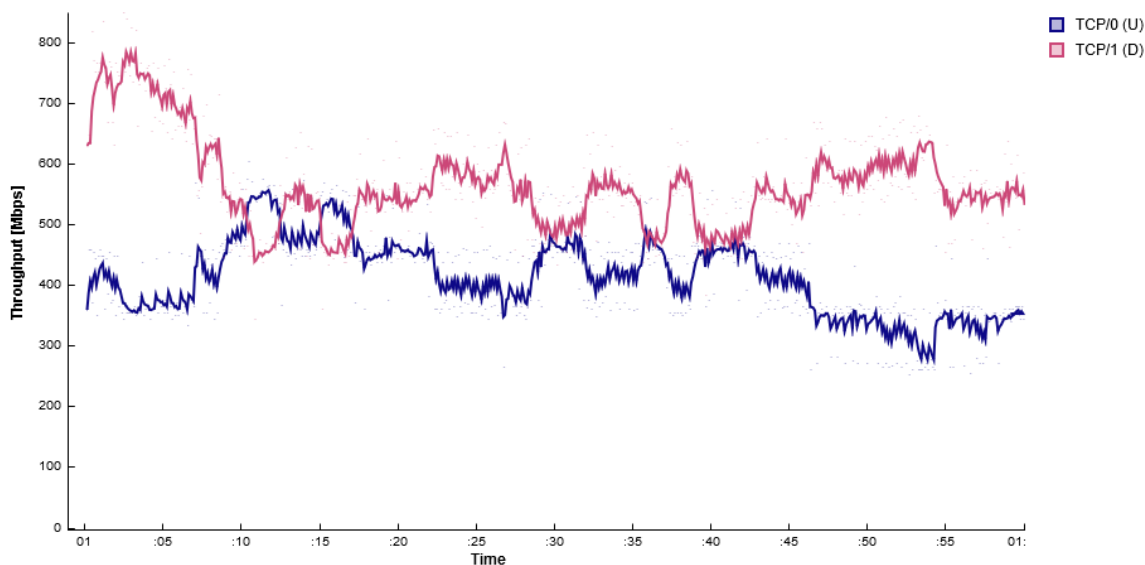
Tabulka 4.4: Porovnání parametrů AP při natočení přímo a při vyosení.

Pro zhoršení parametrů spoje bylo AP na bloku B3 natočeno přibližně o 80° a tím byl simulován útlum o velikosti přibližně 11 dB (odpovídá přibližně 800 m při měrném útlumu cca 14 dB/km z grafu 3.4). V této situaci byla kapacita dostačující pro jednosměrný provoz, ale pro obousměrný provoz dostatečná nebyla. Docházelo zde k poklesům přenosové rychlosti a „vyplňování“ těchto poklesů navýšením přenosové kapacity v druhém směru přenosu z důvodu využití TDM (Time Division Multiplex - časový multiplex³). Tento trend je zobrazen na obrázku 4.6.

³Časový multiplex je rozdělení vysílání v obou směrech do tzv. timeslotů - vyhrazených časových okamžiků, ve kterých se posílá informace vždy v jednom ze směrů přenosu, a tím se předchází ovlivňování přenášených dat, které jsou přenášeny ve stejném frekvenčním pásmu oběma směry.

Z obrázku číslo 4.6 je zřetelně vidět střed protínání průběhů obou směrů, který se nachází těsně pod úrovní 500 Mbit/s. Při součtu průměrných rychlostí z obou směrů vychází rychlost přibližně 981 Mbit/s, tato hodnota je pouze orientační. Z naměřených hodnot RTT je jednoznačně vidět, že takto nastavený spoj je méně kapacitní oproti přímému natočení AP (hodnoty dosahovaly přibližně 3 krát vyšších hodnot oproti přímému natočení).

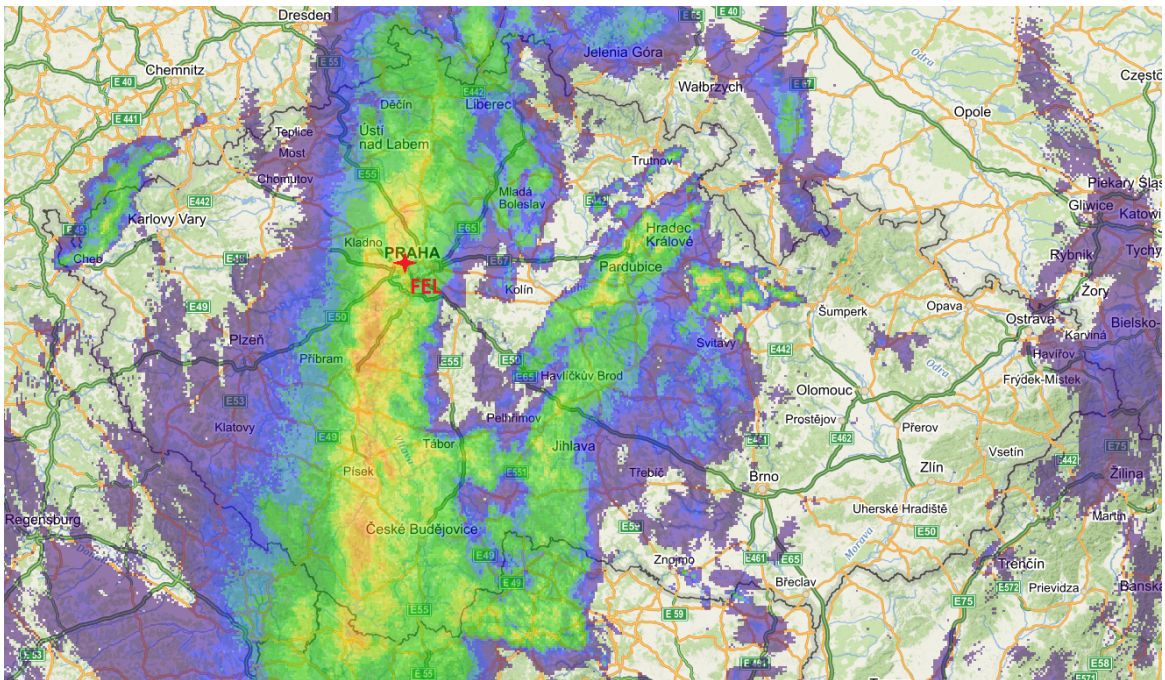
Dalo by se očekávat, že pokud by byla technologie náchylná k atmosférickým vlivům, bylo by to v tomto nastavení sestavy zřetelné. Na rozdíl od minulého případu se zde podařilo snížit kapacitu spoje na měřitelnou úroveň F-Testeru, která činí maximální datový tok o 1 Gbit/s.



Obrázek 4.6: Zobrazení průběhu přenosové rychlosti pro vyosené AP

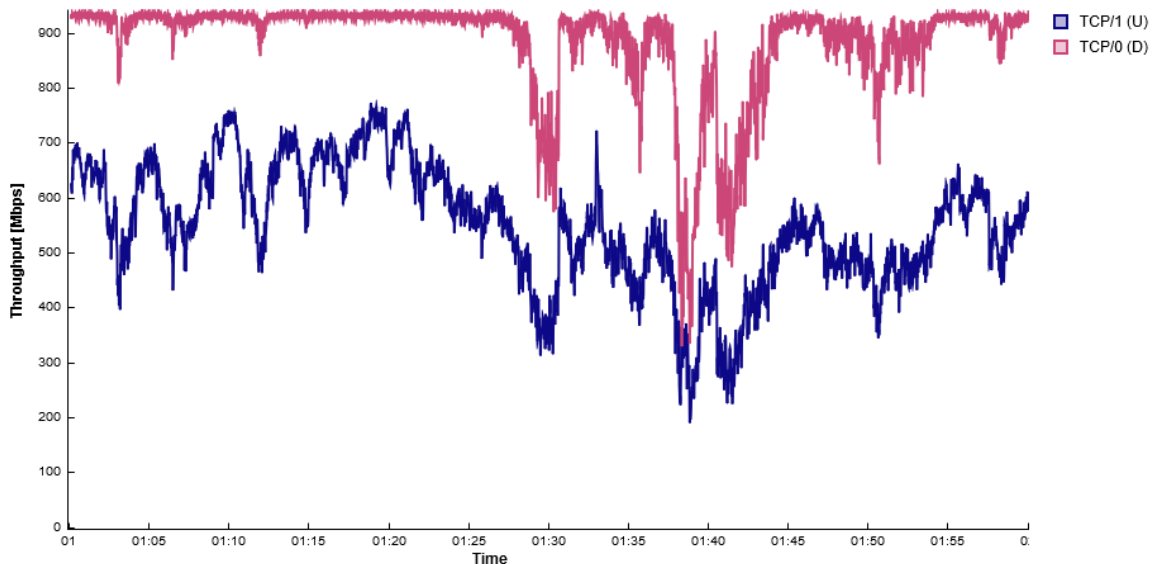
Měření při zhoršených atmosférických podmínkách

Pro měření za zhoršených podmínek bylo potřeba, aby se vyskytly v místě měření silné srážky. Za těchto podmínek by se poté měřily parametry přenosu. Tato situace nastala na přelomu 30. dubna 2020 a 1. května 2020 v hodinách blízko půlnoci. Na obrázku 4.7 je zobrazena situace v čase 00:40 hod. 1.5.2020, kdy probíhalo měření. Ze záznamu je vidět, že v té době byly podle radaru v místě měření (střecha budovy FEL ČVUT) silné srážky. Barva podle meteroradaru dosahovala od žluté po oranžovou. Tyto barvy definují silnou intenzitu srážek s hodnotou kolem 10 mm/hod [24].

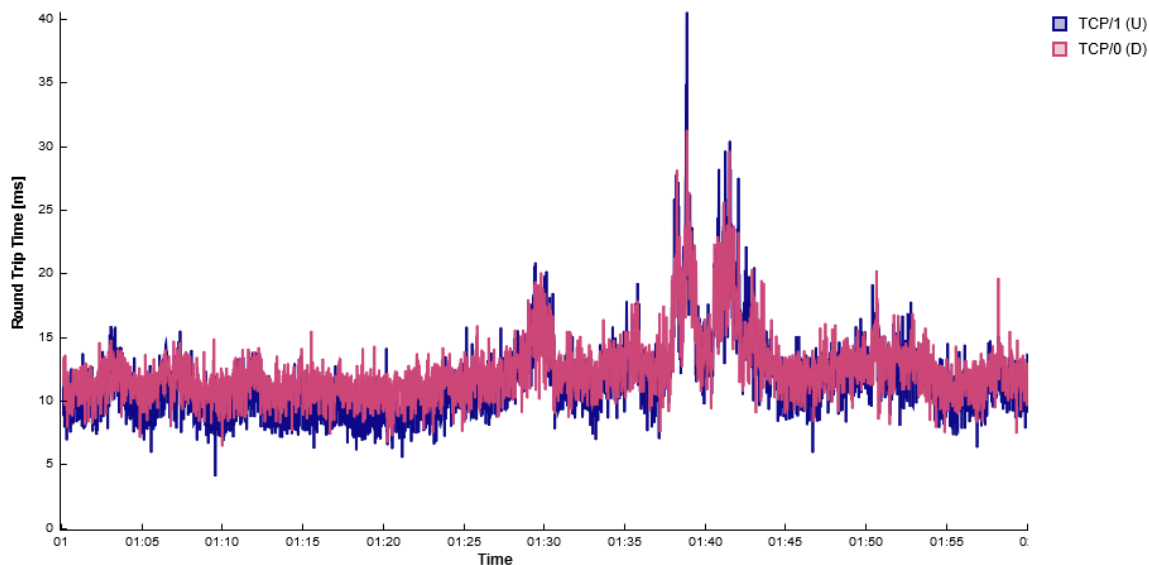


Obrázek 4.7: Záznam z meteoradaru ze dne 1. května 2020 v čase 00:40:00 středoevropského letního času (SELČ)

Měření bylo započato o půlnoci SELČ a doba trvání měření byla stanovena na jednu hodinu. Přibližně v době 00:40 hodin po půlnoci je zřetelný pokles přenosové rychlosti, který nastal v důsledku silných srážek v místě měření. Průběh přenosové rychlosti je zobrazený na obrázku 4.8 a na obrázku 4.9 je zobrazené zpoždění RTT.



Obrázek 4.8: Průběh měření přenosové rychlosti při silných srážkách dne 1. května 2020 v čase od půlnoci po dobu trvání jedné hodiny



Obrázek 4.9: Průběh měření RTT při silných srážkách dne 1. května 2020 v čase od půlnoci po dobu trvání jedné hodiny

Při silném dešti se zpoždění RTT přibližně zdvojnásobilo a nejvyšší výpadek (lokální maximum) bylo přibližně 4 krát větší než průměrné zpoždění.

Přenosová rychlost byla zasažena ve větší míře. V první části záznamu je možné vidět, že směr downstream je na maximální možné propustnosti, a důležité události jsou znatelné pouze při velkém snížení přenosové kapacity kanálu. V tomto čase silných srážek byla přenosová kapacita kanálu přibližně na hodnotě 600 Mbit/s, což je přibližně třetina propustnosti oproti stavu beze srážek.

Z výsledků měření vyplývá, že spoj využívající pásmo 60 GHz je při silném dešti velmi ovlivňován počasím. Při pokusu, ve kterém byly AP donuceny pracovat v těžších podmínkách (byl přidán útlum 12 dB, odpovídající přidáním přibližně 850 m vzdálenosti, způsobený natočením AP přibližně o 80°), ve kterých nebylo možné pomocí AP dosáhnout plného využití možné přenosové kapacity a přenosová rychlost byla snížena na hodnotu nižší než 1 Gbit/s. V této situaci byla přenosová kapacita kanálu okolo 930 Mbit/s downstream a 670 Mbit/s upstream, dohromady přibližně 1600 Mbit/s obousměrně. V tomto nastavení byly AP testovány při silných srážkách a při nejsilnějších srážkách byla kapacita přenosu kanálu přibližně 600 Mbit/s, což odpovídá zhoršení přibližně o $\frac{2}{3}$ z průměrné kapacity při jasném počasí.

Z tohoto důvodu je zahrnuto negativní ohodnocení technologie WiGig pro velkou závislost na počasí a ohodnoceno stupněm 3.

4.2 Měření parametrů GPON

Pro měření parametrů přípojky zřízenou technologií GPON byly použity uvedené komponenty:

- měřící zařízení - F-Tester,
- ONU - Huawei EchoLife HG8010H,
- OLT - Huawei DSLAM MA5600T-H802MABH s OLT kartou GPBH,
- O/E převodník - KTI KGC-310M-LX,
- hub - Micronet SP243B.

O měřících zařízeních F-Tester pojednává předchozí podkapitola [Měřící zařízení – F-Tester](#). Použití F-Testerů pro měření parametrů bezdrátového spoje je uvedeno v kapitole 4.1.

ONU - Huawei EchoLife HG8010H

ONU je koncovou jednotou pro technologii GPON, která se používá jako účastnická zásuvka. ONU obsahuje napájecí konektor a dva komunikační porty. Jeden port je pro připojení optického vlákna a využívá konektor typu SC/APC pro jednovidové vlákno. Využívá přenosové rychlosti 2,5 Gbit/s pro downstream a 1,25 Gbit/s pro upstream. Pro oddělení směrů přenosu v optickém vláknu používá vlnové délky 1310 nm pro upstream a 1490 nm pro downstream [22]. Druhým portem je 1GE port pro připojení LAN. Zařízení je zobrazeno na obrázku 4.10.

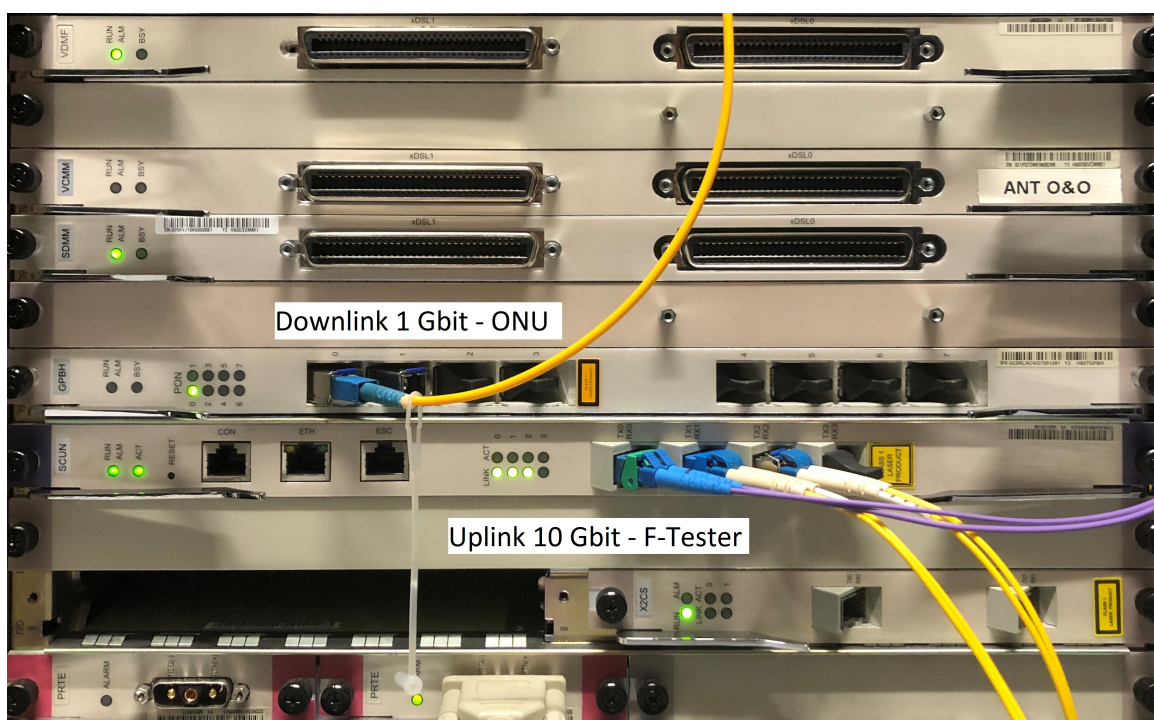


Obrázek 4.10: Zobrazení ONU [22], které bylo použito pro měření

OLT - Huawei DSLAM MA5600T-H802MABH s OLT kartou

OLT je rozšiřující karta, která je využita v CO DSLAM pro distribuci GPON provozu v síti. Jednotlivá zařízení, která bývají instalována v ústřednách, se běžně mezi sebou a mezi ústřednami napojují sériově přes 10 Gbit spoje do traťových úseků pro připojení internetu. Pro uplinkový port je použit SFP modul s rychlostí 1/10 Gbit/s a konektory LC dual, kde se využívá jedno vlákno jako přijímací (Rx) a druhé jako odesílací (Tx). Pro downlinkový port je použita šachta v OLT kartě pro fullduplexové SFP pro GPON s rychlostí 2,5 Gbit/s (podle potřeby může být upraveno a použit nižší profil pro GPON rychlosti) [21].

Na obrázku 4.11 je zobrazen DSLAM použitý pro účely měření se zapojenou OLT kartou (GPBH).



Obrázek 4.11: Zobrazení DSLAM, který byl použit pro měření parametrů technologie GPON

Tento typ DSLAMu (Huawei MA5603T) je vysoký 6U a je určený pro CO lokality. Uplink zařízení zajišťují až 2 karty typu SCUN, každá se 4 šachtami pro SFP+ moduly s rozhraním 1/10 Gbit/s. SFP moduly mají rozhraní dual LC/PC, kde se používá dvouvláknová komunikace s využitím jedné vlnové délky. V jednom portu (port 3) bylo zapojeno měřicí zařízení F-Tester s využitím O/E převodníku. Pro downlink byla použita OLT karta (H807GPBH) s 8 šachtami pro SFP moduly určené pro GPON. Pro měření byla použit port č. 1. Oproti směru uplink jsou SFP moduly v OLT kartě jednovláknové a používají pro komunikaci dvě vlnové délky. Ve směru uplink byla OLT karta zapojena optickým vláknem do ONU se zapojeným útlumovým článkem.

Útlumový článek o hodnotě 10 dB byl použit z důvodu vysokého výkonu, který byl na krátké trase k ONU generován bez zapojení splitteru či jiných prvků, se kterými se počítá v návrhu GPON topologie.

O/E převodník - KTI KGC-310M-LX

Kvůli uplinku na DSLAM byl potřeba použít převodník z optického zařízení na elektrickou energii a opačně. K tomuto účelu byl použit O/E převodník od KTI, který disponuje dvěma porty. Jeden port je na RJ45 konektory pro UTP s rozhraním 1 GE, druhý port je SFP šachta pro optická vlákna [30]. SFP bylo využito s rychlostí 1 Gbit/s a rozhraním dual LC/PC, které bylo totožné, jako uplinkový port DSLAMu. Tímto byl zajištěn převod z GE používající NET port F-Testeru na optický signál, který komunikoval s DSLAMem. Na obrázku 4.12 je zobrazen O/E převodník použitý v měřící sestavě.



Obrázek 4.12: Zobrazení O/E převodníku, který byl použit pro měření parametrů technologie GPON [30]

Hub - Micronet SP243B

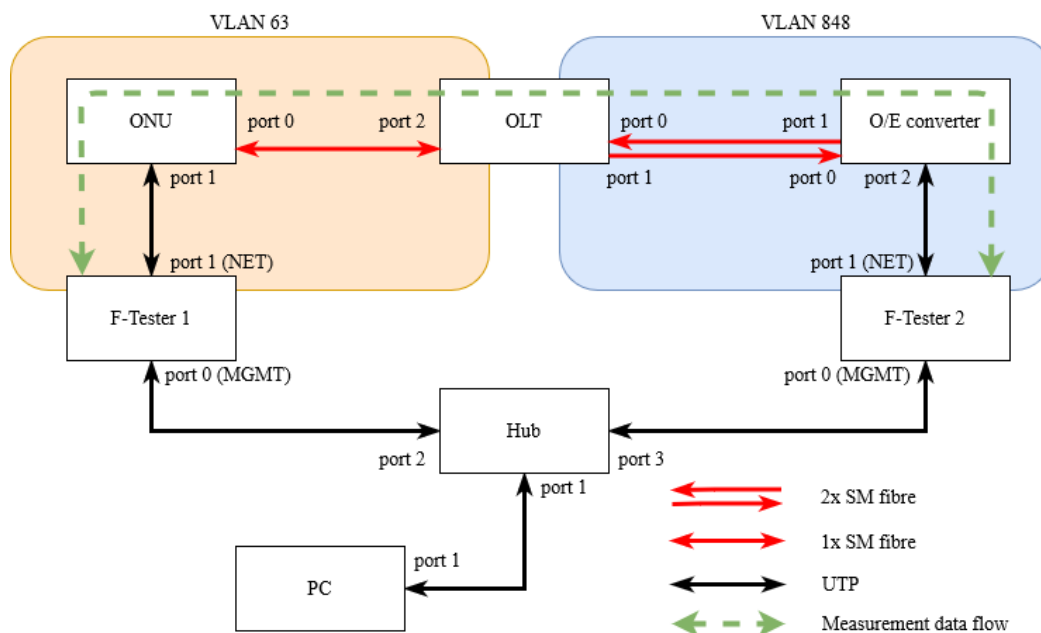
Pro současné zapojení obou řídicích portů F-Testerů k PC bylo použito síťové zařízení Hub. V úloze měření 60 GHz spoje byla využita pro toto připojení VPN, která zde nebyla nutná, protože F-Testery byly blízko u sebe, a tak bylo možné fyzické propojení MGMT rozhraní.

4.2.1 Zapojení sestavy pro měření technologie GPON



Obrázek 4.13: Vyfocená zapojená sestava, která byla použita pro měření parametrů na technologii GPON

Obrázek 4.13 demonstruje zapojenou sestavu pro měření na technologii GPON. Schématické zapojení sestavy je zobrazeno na obrázku 4.14.



Obrázek 4.14: Schématické zapojení sestavy pro měření parametrů technologie GPON

MGMT porty F-Testerů byly připojeny UTP kabely do portů hubu, do kterého byl připojen rovněž řídicí PC. Na všech MGMT portech byly nastaveny IP adresy ve stejném rozsahu sítě, aby bylo možné z dohledového PC přistupovat k MGMT rozhraním F-Testerů. V tomto zapojení probíhala dohledová část sestavy.

F-Tester 1 byl z datového portu - port 1 (NET) - připojen UTP kabelem do portu 1 na ONU. ONU bylo propojeno SM optickým vláknem z optického portu používající konektor SC/APC na straně ONU do SFP modulu v OLT kartě (downlink), kde byl použit konektor SC/PC. Ve směru uplink z OLT karty byla použita dvě vlákna pro propojení s O/E převodníkem. Pro propojení obou stran byly použity SFP moduly používající dual FC/PC konektory pro propojení obou stran. Po jednom vlákně byl provoz ve směru do DSLAMu z převodníku a na druhém vlákně byl provoz v opačném směru. Propojení O/E převodníku s NET rozhraním F-Tester 2 bylo zajištěné UTP kabelem. V tomto zapojení probíhala měřicí část sestavy.

Samotné měření probíhalo mezi porty NET F-Testeru 1 a F-Testeru 2. Po zapojení sestavy a konfigurace jednotlivých zařízení bylo zjištěno, že pro komunikaci skrz DSLAM je potřeba zajistit provoz na určitých VLAN (Virtual LAN), konkrétně ve směru k OLT VLAN 63 a ve směru k ONU VLAN 848. Pokud by se dané VLAN nenakonfigurovaly, provoz, který by byl generován F-Testery, by tak DSLAM nepřijal a měřicí linka by se nepropojila.

Při zapojování sestavy byl zjištěn problém na portu 1 (NET) F-Testeru 1, kde při zapojení s portem na ONU nedošlo ke správnému dohodnutí profilu rozhraní a byl zvolen profil 100 Mbit/s s half duplexním přenosem (ostatní rozhraní pracovala na rychlostech 1 Gbit/s s full duplexním přenosem). Tento problém přetrvával i při přepojení do všech ostatních NET

portů, včetně portů na F-Testeru 2. V tomto stavu nebylo možné zajistit konektivitu mezi NET porty. Příčinu nefunkčnosti auto-negotiation⁴ se nepodařilo odhalit, proto byla tato funkce vypnuta a manuálně nastavena rychlost 1000 Mbit/s s full duplexním přenosem. Při kontrole, zda se změna projevila, bylo zjištěno, že nastavení rozhraní se nezměnilo a zůstalo v původním nastavení. Změna fungovala pouze za situace, kdy byl na rozhraní nastaven full duplexní přenos, ale nepodařilo se nastavit rychlost na 1 Gbit/s.

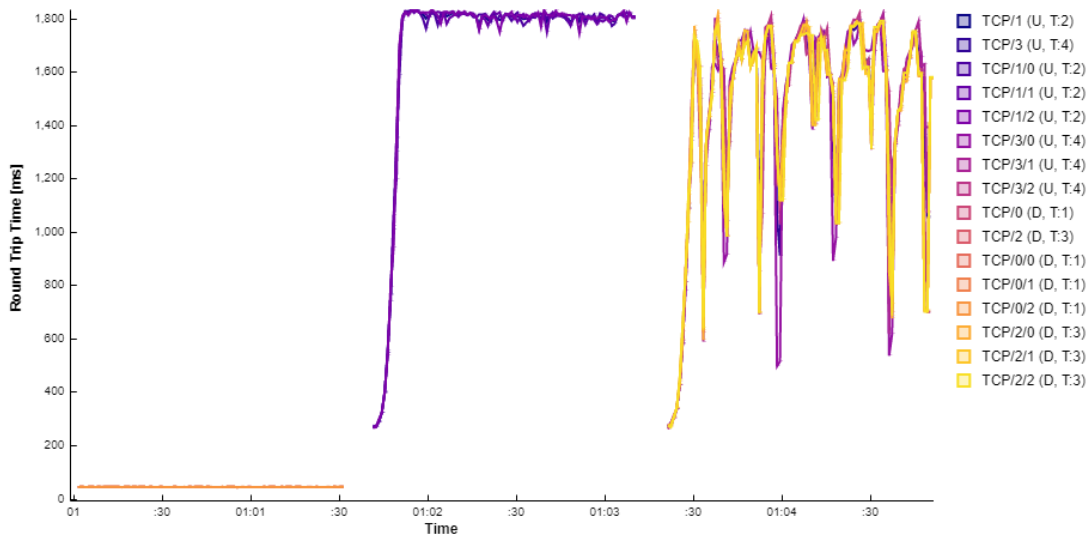
Naměřené hodnoty a průběh přenosové rychlosti při zkoušce testu s profilem NGA basic je zobrazen na obrázku 4.15.



Obrázek 4.15: Výpis z F-Testeru po testu se schématem NGA basic na technologii GPON

Po uvážení, že se zde projevilo tzv. úzké hrdlo - snížený profil na jediném spoji z celé sestavy, byla průměrná rychlost měřená ve směru z ONU do F-Testeru (směr downlink z pohledu účastníka) přibližně 65 Mbit/s. Tato hodnota je vyšší než polovina hodnoty z místa úzkého hrdla (100 Mbit/s). Výrazný pokles rychlosti nastal ve směru upstream, kde průměrná hodnota přenosové rychlosti dosahovala okolo 1,7 Mbit/s. V tomto místě dosahovalo zpoždění RTT hodnot vyšších než 1800 ms (zobrazeno na obrázku 4.16). V průběhu měření byla hodnota RTT stabilní okolo hodnoty 1800ms. V části testu obousměrného měření byla přenosová kapacita pro oba směry pod hodnotou 2 Mbit/s. Zpoždění RTT velmi kolísalo a pohybovalo se mezi hodnotami 600 a 1800 ms.

⁴Auto-negotiation je funkce rozhraní Fast Ethernetu, která automaticky vyměňuje informace s protistranou o možných rychlostech použitelných na lince (např. 10/100/1000 Mbit/s) a o formě duplexu (zda se bude jednat o half nebo full duplexní přenos) a nastaví automaticky nevhodnější variantu. [2]



Obrázek 4.16: Výpis z F-Testeru po testu se schématem NGA basic na technologii GPON - RTT

Tento jev nastal pravděpodobně kvůli zahlcení paměti z důvodu nízké přenosové rychlosti a použití velké velikosti MTU, která byla nastavena na hodnotu 1500 bitů. Tato velikost rámce byla použita i pro měření 60 GHz spoje.

Závěr z měření technologie GPON je takový, že měření nebylo proveditelné se stejným nastavením, jaké bylo pro 60 GHz spoj. Naměřené parametry nejsou vypovídající o přenosových parametrech technologie GPON a z důvodu neznámé chyby na propoji mezi F-Testerem 1 a ONU nebylo měření zahrnuto pro účely této práce.

Kapitola 5

Porovnání technologií

V této kapitole jsou popsány metriky, které rozhodují při výběru technologií pro ekonomickou rozvahu nad atrakčními lokalitami. Za použití následujících metrik byly vybrány technologie, které byly využity pro připojení dané lokality k internetu.

Pro parametry připojení byly porovnávány metriky:

- přenosová rychlost,
- maximální vzdálenost (překlenutelná a pro maximální propustnost),
- jednosměrné zpoždění,
- agregace (maximální počet uživatelů na jeden aktivní prvek) a
- závislost na atmosférických jevech.

První výběr technologií se týká těch, které splňují výzvu VHCN, tzn. minimální přenosová rychlost 100 Mbit/s. Pro záměry této práce navíc přibyla podmínka pro využití technologií, které jsou tzv. „gigabit ready“ – jejich přenosová rychlost je vyšší než 1 Gbit/s. V úvodu této práce bylo předpokládáno s technologiemi, které splňují hranici pro výzvu VHCN. Z dalšího porovnání byla vyřazena metalická technologie VDSL2, která umožňuje maximální přenosovou rychlost do 250 Mbit/s. Do porovnání nebyla zahrnuta technologie DOCSIS z důvodů absence parametrů pro dané metriky (vzdálenosti).

Ze skupiny bezdrátových technologií je vyřazena technologie Wi-Fi (IEEE 802.11ac) s přenosem SISO o šířce kanálu 80 MHz, která dosahuje rychlosti až 0,5 Gbit/s. Při využití komunikace MIMO 8x8 a šířky kanálu 160 MHz se tato kapacita navyšuje a pro své účely může dosahovat rychlostí až 6,5 Gbit/s. Dále je vyřazena technologie LTE, která má omezení na 300 Mbit/s. Její nástupce, LTE-A, dosahuje rychlostí až 3 Gbit/s, proto je vhodná k následujícím rozvahám.

Pro určení technologie, která v porovnání s ostatními technologiemi měla nejlepší celkové parametry, byla navržena metodika hodnocení následovně. Bylo stanoveno bodovací kritérium od 1 do 5 podle parametrů (viz obrázek 5.2), pro jednotlivé parametry byly určeny váhy parametru pomocí bodů a výsledné hodnocení bylo vypočteno pomocí váženého průměru bodového hodnocení jednotlivých parametrů (viz obrázky 5.1 a 5.3).

5.1 Metriky

Pro účely porovnání technologií je potřeba zavést metriky, které budou porovnávat technické a ekonomické aspekty za účelem výběru nejvhodnější technologie pro danou lokalitu.

5.1.1 Technické parametry připojení

Přenosová rychlost

Přenosová rychlost je v metrice rozdělena na dvě části, směr **upstream** a **downstream**. U technologií GPON a XG-PON jsou uvedené rychlosti rozdílné, pro ostatní technologie jsou tyto rychlosti symetrické. Při výběru technologií byl kladen velký důraz na přenosové rychlosti, a proto byla metrika výběru technologie stanovena na 60 bodů, 30 bodů pro každý ze směrů přenosu.

Pokud by se jednalo o výběr technologie 10GEPON nebo XG-PON pouze na základě přenosové rychlosti, 10GEPON by tento duel vyhrála, protože dosahuje rychlosti 10 Gbit/s symetricky, zatímco XG-PON dosahuje rychlostí pro downstream 10 Gbit/s a pro upstream 2,5 Gbit/s. V případě technologie XGS-PON rychlosti dosahují 10 Gbit/s symetricky stejně, jako 10GEPON a tyto dvě technologie jsou v ohledu přenosové rychlosti rovnocenné.

Maximální vzdálenost

Dalším důležitým aspektem pro porovnání je dosah technologie. Uvažujeme dva typy vzdáleností.

Maximální překlenutelná vzdálenost definuje vzdálenost, kterou je daná technologie schopná překlenout za stálé funkčnosti. Přenosové parametry na této vzdálenosti jsou zhoršené na minimální možný provoz s výskytem velkého rušení a tím spojené korekce chyb či přeposílání dat. V těchto místech přenosová rychlost velmi degraduje.

Např. z porovnání vypsáném v tabulce 3.1 je zcela zřejmé, že G.fast má maximální překlenutelnou vzdálenost pouze 250 metrů. Z rodiny bezdrátových technologií dosahuje např. LTE-A až 35 km. Pro optické technologie je maximální překlenutelný dosah v rodině GPON až 60 km.

Dosah pro maximální propustnost je vzdálenost, kde je ještě možné dosáhnout maximální možnou přenosovou rychlost. Např. technologie WiGig má maximální dosah přibližně 3 kilometry, ale maximální dosah při využití maximální propustnosti je okolo 40 metrů (pro přenosovou rychlost 6,75 Gbit/s). Zatímco GPON třídy C+ dosahuje maximální vzdálenosti do 60 kilometrů, tak dosah pro maximální propustnost je totožná s maximální překlenutelnou vzdáleností. Jediný degradující parametr je odezva, která narůstá se zvětšující se vzdáleností mezi zařízeními.

Při výběru technologie se zohledňuje také maximální možná vzdálenost, pro kterou se dá technologie použít. Proto byla stanovena hodnota metriky na 30 bodů. 10 bodů bylo přiřazeno maximální překlenutelné vzdálenosti a 20 bodů za dosah pro maximální propustnost.

Zpoždění

Parametr zpoždění je pro záměry této práce minoritní, protože každá technologie má z hlediska rychlosti přenosu informace při použití na různé vzdálenosti odlišné zpoždění. Z tohoto hlediska je hodnota metriky určena na 5 bodů.

Maximální možná agregace

Tento parametr je z pohledu použitelnosti technologie dvousečný. V případě nízké agregace se při plném využití linky dostane k zákazníkovi vyšší přenosová rychlost, ale je potřeba více aktivních technologií pro pokrytí stejného množství zákazníků než je v případě vyšší možné agregace. Při výstavbě je z hlediska investic vždy více žádoucí využívat méně aktivních prvků pro pokrytí větší oblasti.

Například technologie WiGig může mít agregaci 1:8, ale LTE-A dosahuje násobně vyšší úrovně agregace. To stejné platí pro 10GEPON, kde je agregace maximálně 1:32 a u XGS-PON dosahuje agregace až 1:256. Pro agregaci byla určena váha metriky na 20 bodů.

Závislost na atmosférických jevech

Jediný záporný parametr zde představuje závislost na atmosférických jevech. Jedná se především o mlhu, déšť, sníh nebo smog. Je známo, že tyto jevy ovlivňují především bezdrátové technologie, zatímco technologie využívající optická vlákna jsou vůči těmto jevům imunní.

Nejvíce náchylná technologie na atmosférické jevy je FSO. U této technologie je vysoká pravděpodobnost přerušení spojení v důsledku silných srážek nebo silné mlhy. Obdobně dochází k útlumům při vyšší koncentraci smogu (drobné částice, např. prachu). Dalšími náchylnými technologiemi jsou bezdrátové systémy využívající kratších vlnových délek (WiGig, E-Band), které mají vyšší útlumy pro malé částice.

Pro tuto metriku byla určena hodnota 5 bodů, které se odečítají od celkového hodnocení v případě závislosti na počasí.

5.2 Aplikace metrik

Nejprve byla přepsána tabulka 3.1 určená pro porovnání parametrů technologií.

parametry	technologie												
	G.fast	G.mgfast	WiFi MIMO 8x8	WiGig	E-Band	LTE-A	GPON C+	EPON typ 2	10GEPON	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2	FSO
Přenosová rychlost DOWN [Gbit/s]	2,5	10	6,5	6,75	3	3	2,5	1,25	10	10	10	80	30
rychlost UP [Gbit/s]	2,5	10	6,5	6,75	3	3	1,25	1,25	10	2,5	10	80	30
Maximální překlenutelná vzdálenost [km]	0,5	0,1	12	3	20	35	60	20	20	60	60	60	7
Dosah pro maximální propustnost [km]	0,1	0,04	0,07	0,04	1	0,3	40	10	10	40	40	40	1,5
Zpoždění [ms]	1	1	4	1	1	2	3	1	5	10	10	10	1
Maximální agregace [1:N]	48	48	4	8	1	30	64	32	32	254	254	8	1

Obrázek 5.1: Tabulka pro porovnání technologií – data parametrů jednotlivých technologií

V dalším kroku byly stanoveny rozhodovací úrovně hodnocení, které měly hodnoty 1 (nejhorší) až 5 (nejlepší). Pro každý parametr byla zvolena priorita metriky, která udává hodnotu, kterou se přičítá do celkového hodnocení (viz obrázek 5.2).

	Priorita	Hodnocení					
	120	1	2	3	4	5	
Přenosová rychlost	DOWN [Gbit/s]	30	2	3	5	10	80
	UP [Gbit/s]	30	2	3	5	10	80
Maximální překlenutelná vzdálenost [km]	10	0,5	1	5	25	60	
Dosah pro maximální propustnost [km]	20	0,1	0,5	1	2	40	
zpoždění [ms]	5	6	4	3	2	1	
maximální agregace [1:N]	20	8	16	32	64	254	
závislost na počasí	5						

Obrázek 5.2: Tabulka pro porovnání technologií – rozhodovací úrovně parametrů a jejich priorita do celkového hodnocení metrik

Podle hodnot uvedených parametrů byly určeny známky pro jednotlivé technologie. Po jednoduchém roznásobení známky s její prioritou a výpočtu aritmetického průměru všech těchto násobků bylo dosaženo celkového hodnocení dané technologie (viz obrázek 5.3).

parametry	technologie												
	G.fast	G.mgfast	WiFi MIMO 8x8	WiGig	E-Band	LTE-A	GPON C+	EPON typ 2	10GEPON	XG-PON	XGS-PON	NG-PON2	FSO
Přenosová rychlost	2	4	4	4	2	2	2	1	4	4	4	5	5
Maximální překlenutelná vzdálenost [km]	2	1	4	3	4	5	5	4	4	5	5	5	4
Dosah pro maximální propustnost [km]	2	1	1	1	3	2	5	5	5	5	5	5	4
Zpoždění [ms]	5	5	2	5	5	4	3	5	1	1	1	1	5
Maximální agregace [1:N]	4	4	1	1	1	3	4	3	3	5	5	1	1
Závislost na počasí	0	0	2	3	3	2	0	0	0	0	0	0	4
Hodnocení	2,38	3,13	2,67	2,67	2,08	2,33	2,79	2,38	3,71	3,63	4,13	3,96	3,71

Obrázek 5.3: Tabulka porovnání technologií – výsledky porovnání technologií podle parametrů

V celkovém hodnocení nejlépe obstála technologie XGS-PON s hodnotou 4,13, následovala metalická technologie G.mgfast s hodnotou 3,13 a z bezdrátové technologie vyšla nejlépe technologie WiGig (IEEE 802.11ad) a WiFi s nastavením MIMO 8x8 a šířkou kanálu 160 MHz s hodnotami 2,67. Pro ekonomickou rozvahu nad atrakčními lokalitami byly vybrány technologie XGS-PON, G.mgfast a WiGig, které budou aplikovány pro realizaci přístupových sítí daných atrakčních lokalit.

Technologie G.mgfast a XGS-PON nejsou na trhu rozšířenými variantami a z tohoto důvodu jsou vybrány technologie ze stejné rodiny. Technologie G.mgfast byla nahrazena technologií G.fast a technologie XGS-PON byla nahrazena technologií GPON.

5.3 Ekonomická kalkulace vybraných technologií

Pro efektivní ekonomickou rozvalu nad atrakčními lokalitami bylo potřeba vytvořit seznam prvků potřebných pro zhotovení výstavby. Výkopová část bude společná pro metalickou i optickou technologii, protože bezdrátová technologie nepotřebuje k realizaci výkopovou činnost pro připojení od centrálního prvku k jednotlivým CPE při budování nové infrastruktury.

Pod výkopovou činností je zahrnuta i realizace projektové dokumentace a vyřízení ÚR na stavebním úřadu. Pro technologii metalickou v případě výkopů pro přírodní optický kabel je kalkulace totožná s optickou technologií. Pro výkopy určené pro metalické kabely budou odlišné kalkulace s ohledem na úložná média oproti technologiím optickým.

Projektová dokumentace bývá zaplácena plánovači paušálně v závislosti na rozsahu práce. Totéž platí pro poplatky spojené s vyřízením ÚR a věcnými břemeny.

Aktivní technologie jsou pro všechny typy technologií odlišné a jsou dostupné od různých výrobců. Tyto aktivní prvky budou popsány a bude uveden maximální počet uživatelů, který je možný na daný aktivní prvek připojit.

Položka nájmu je velmi rozličná v závislosti na umístění lokality a umístění technologie v objektu. Ceny nájmu jednotlivých místností či umístění na stožárech je vyšší, čím více se umístění blíží aglomeračnímu centru. Naopak v případě umístění v odlehlých místech se může jednat o jednodušší odkoupení daného prostoru a tím předejít periodické platbě nájmu. Běžným případem nájmu může být oboustranná dohoda. Nájemník poskytuje internetové připojení pronajímateli jako kompenzaci platby za nájem. Pro lokality s exkluzivitou mohou nájemní dosahovat částek k 10 tis. Kč za měsíc. Pro běžné lokality se mohou pohybovat od 500 Kč až 1500 Kč za měsíc. V případě továrních komínů se cena pohybuje okolo 4 tis. Kč za měsíc.

Hlavním ekonomickým faktorem je technická připravenost lokality. Lokalita může být například již napojena na metalickou infrastrukturu. Pro případ technologie G.fast je možné využít tyto rozvody k distribuci internetu a pokrytí velké části lokality bez nutnosti provedení velkého množství výkopů pro danou lokalitu. V případě ekonomické rozvahy s optickou přípojkou by v tomto případě měla technologie G.fast oproti optické technologii mnohem nižší celkové náklady.

Investoři počítají pro nově napojované lokality návratnost investice. Návratnost investice obvykle počítají do 30 let, kdy se odhaduje technická výměna infrastruktury. Investor předpokládá průběh penetrace služeb v lokalitě, které mu generují zisk. V dokumentu na stránkách MPO [37] od Grant Thornton Advisory s.r.o. s názvem „Analýza stavu rozvoje sítě NGA v ČR“ je zmíněna situace, kdy poskytovatelé internetu jsou ochotni investovat do realizace přípojky. Poskytovatelé jsou podle modelu ochotni investovat tam, kde je možné dosáhnout vysoké penetrace zákazníků (alespoň 60 % během 4 let) a cena vybudování disponibilní přípojky je do 15 tis. Kč. V této práci nebudou počítány návratnosti investic, ale cena disponibilní přípojky bude uváděna v ekonomické rozvaze pro dané lokality.

V provozních nákladech jsou zahrnuty nákupy doplňujících aktivních prvků (typicky doplňující SFP moduly či rozšiřující karty do CO lokalit), případně pořízení doplňujících splitterů při zaplnění výstupů ve stávající lokalitě. Do OPEX jsou zahrnuty i poplatky za pronajaté místnosti pro aktivní a pasivní technologie či stožáry pro bezdrátové spoje.

Pro ekonomickou kalkulaci je použit ceník firmy CETIN a.s. dostupný pro plánovače.

5.3.1 Výkopy a montáž

V tabulce 5.1 jsou uvedeny ceny pro výkopy prováděných pro jednotlivé typy povrchů za 1 metr výkopu.

Typ výkopů [šířka/hloubka výkopů v cm]	Cena výkopu [Kč za metr]
Převzetí výkopů se zřízení kabelového lože	80,-
Rýha bez povrchu 25/50	110,-
Rýha v trávě 35/70-100	280,-
Rýha v chodníku betonové desky 25/50	400,-
Rýha v chodníku litý asfalt 25/50	550,-
Rýha v chodníku litý beton 25/50	500,-
Rýha v chodníku mozaika 25/50	500,-
Rýha v chodníku zámková dlažba 25/50	400,-
Rýha ve vozovce kostky 50/100	914,-
Rýha ve vozovce litý asfalt 50/100	1064,-
Rýha ve vozovce zámková dlažba 50/100	1110,-
Rýha vjezd kostky 35/70-90	700,-
Rýha vjezd litý asfalt 35/70-90	850,-
Rýha vjezd zámková dlažba 35/70-90	800,-
Podvrt řízený do 150 mm	2500,-

Tabulka 5.1: Porovnání cen výkopů použitých pro jednotlivé povrchy

Pro zjednodušení odhadu ceny za provedené výkopy je zavedena jednotná cena výkopů na hodnotu 540,- Kč/m. Cena je určena aritmetickým průměrem všech typů povrchů. Uvedené ceny v tabulce 5.1 jsou shodné pro všechny typy realizace, ve kterých je potřeba umístit sdělovací kabel do zemní trasy. Ceny montáže určených pro jednotlivé typy sdělovacích médií jsou uvedeny v tabulce B.2. Jedná se o ceny montáže za 1 metr nebo za kus (např. spojky).

Do připravených optických tras se musí započítat i proces zafukování optických kabelů do trubek nebo mikrotrubiček. Jednotlivý výpis položek za zafukování je vypsán v tabulce B.3.

Protože se u výstavby a montáže nejedná pouze o zemní práce, v tabulce B.4 jsou uvedeny ceny za montáž nadzemních prvků jako jsou rozvaděče, nadzemní spojky či montáž vnitřních tras vedení a spojek. Ceny jsou uvedeny za 1 metr montáže nebo za kus.

Položky z tabulky 5.1 jsou započítány jako výkopové práce. Položky z tabulek B.2, B.3 a B.4 jsou započítány jako montáž. S ohledem na plánované délky výkopů, množství komponent sdělovacích médií či instalované kabinety a sloupky, je potřeba tyto položky zahrnout do územního plánu v lokalitě a zakreslit je do projektové dokumentace.

V tabulce B.6 jsou vypsány položky, které jsou účtovány za projednání a zhotovení projektové dokumentace pro projekty.

Pro montáž je zapotřebí, aby fyzické spoje byly správně namontovány. Základním dokumentem při předání stavby je protokol o měření, ve kterém jsou uvedeny hodnoty z měření jednotlivých spojů a s tím záruka zhotovitele, že je vše řádně nainstalováno. Soupis položek za měření je vypsán v tabulce B.7.

5.3.2 Materiál

V předchozí sekci byly probrány ceny za položky, které se běžně vyskytují v různých typech staveb sdělovací infrastruktury za montáž a výkopy, včetně položek souvisejících s montáží - projektování a projednání jednotlivých složek projektu.

V této sekci je pojednáváno o cenách za materiál. Ceny za kabely, trubky a trubičky jsou vypsány v tabulce B.8.

V tabulce B.8 je uvedena cena za materiál, který je potřeba zkombinovat s příslušnou položkou montáže, aby vyšla celková cena pro realizaci. Například pro výkopy v délce 50 m a propojení celkové trasy o délce 200 m je potřeba do nákladů zahrnout příslušný typ výkopů (v položce výkopů je již zahrnuta příprava kabelového lože s montáží trubek či metalického kabelu). Pro případ zafukování optického mikrokabelu je potřeba zahrnout položku zafouknutí trubičkového systému a zafouknutí samotného kabelu do trubičky včetně daného materiálu.

Sdělovací kabely je potřeba ukončit v rozvaděčích, kabelových spojkách nebo využití proařovacích boxů a skříní. V tabulce B.9 je soupis cen materiálu za rozvaděče, kabelové komory a proařovací boxy.

Pro realizaci topologie PON je zapotřebí položka splitterů, které distribuují signál pro více účastníků. Ceny splitterů jsou uvedeny v tabulce B.10. Cena splitterů je závislá na počtu vývodů, především když jsou na vývodech ze splitteru konektory.

5.3.3 Prvky vnitřních rozvodů

Poslední typem materiálů jsou položky určené pro realizaci vnitřních rozvodů. Využijí se zde nehořlavé trubičky i kabely typu RISER a EZ-Bend z tabulky B.8. Položky vnitřních rozvodů jsou vypsány v tabulce B.5.

Pro realizaci vnitřních rozvodů bylo provedeno mnoho propočtů a z důvodu individuálního plánování jednotlivých objektů byla zavedena průměrná hodnota 3300,- Kč/BJ pro vnitřní optické rozvody. Pro vnitřní metalické rozvody byla zavedena hodnota 3900,- Kč/BJ. V těchto cenách jsou zahrnuty horizontální i vertikální části vnitřních rozvodů včetně instalace a materiálu za účastnickou zásuvku. S touto hodnotou je počítáno dále v ekonomické rozvaze pro lokality s bytovými domy.

5.3.4 Příprava pro antény

Do této chvíle bylo pojednáváno o přípravách zemních tras. V rámci výstavby antén je zapotřebí příprava uchycení a oproti technologii PON je potřeba přivést napájení na obě strany přenosu (nejenom v CO lokalitě ale i na straně zákazníka před CPE). Pro malý vysílač na stávající budově je potřeba zřídit stožár, úchyty, rack, ve kterém bude umístěna aktivní technologie, a napájení antény (případně AP). Tato sestava vychází přibližně na 15 tis. Kč. Pro Velký vysílač je potřeba zajistit již příhradový stožár (přibližně 5 tis. Kč za kus) a dimenzování technologie jako v případě malého vysílače vychází cena okolo 30 tis. Kč.

V případě výstavby stožáru ve volném prostoru (např. pole) je maximální výška stavby přibližně do 8 metrů kvůli povolení úřadů [52]. Pro výstavbu stožáru je potřeba zřídit základnovou betonovou kostku (cena se pohybuje okolo 10 tis. Kč), 4 kusy příhradového stožáru (přibližně 20 tis. Kč), rack pro technologii (přibližně 5 tis. Kč) a přívod napájení pro technologii (záleží na lokalitě, cena se pohybuje mezi 5 tis. až 30 tis. Kč).

5.3.5 Aktivní technologie

Pro účely této práce byly vybrány následující položky pro aktivní technologie. Veškeré uvedené ceny byly uvedeny s daní ze dne 9.5.2020.

G.fast

Pro technologii G.fast byla vybraná značka Zyxel, jako DPU (Data Processing Unit - datová jednotka) byl vybrán model GES1116-FSA [49] a jako CPE byl vybrán model XMG3927 B50a [48].

DPU je vybavený přívodním 10 Gbit rozhraním pro dva SFP+ moduly a výstupní rozhraní je 16 portů pro měděné vedení (pro kroucenou dvojlinku nebo koaxiální kabel). Podporuje zapojení typu FTTB nebo i ve venkovním rozvaděči.

CPE je vybavené pro příchozí linku konektorem RJ-14 a disponuje 4 výstupními GE porty na konektorech RJ-45 společně s WiFi připojením v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz.

Cena **DPU** byla 65 tis. Kč a **CPE** stálo €119 (přepočtená cena: 3250,- Kč).

GPON

Pro technologii GPON byla vybraná značka Ubiquiti Networks. Jako OLT jsou vybrána dvě zařízení: UF-OLT-4 [4] a UF-OLT [5]. Jako koncové zařízení je vybráno jedno ONU a jedno ONT. ONU je model UF-LOCO [6]

První z **OLT** zařízení je UF-OLT-4. Je vybavené jedním přívodním portem SFP+ s rozhraním 1/10 Gbit a 4 výstupními porty SFP pro GPON. Druhé zařízení UF-OLT je vybavené dvojnásobným počtem rozhraní jako UF-OLT-4. Výrobce uvádí, že lze na jedno SFP pro GPON zapojit až 128 zařízení ONU. To znamená, že pro zařízení UF-OLT-4 je maximální připojitelný počet koncových zařízení 512 a pro zařízení UF-OLT až 1024 jednotek.

ONU je vybavené vstupním optickým portem na konektoru SC/APC a výstupním GE portem na konektoru RJ-45. ONU neobsahuje žádné další rozhraní. **ONT** oproti ONU obsahuje navíc rozhraní WiFi se standardem 802.11n (2,4 GHz) a celkový počet 4 GE portů.

Cena **OLT se 4 porty** byla 28,5 tis. Kč, varianta **OLT s 8 porty** stála 45 tis. Kč. **ONU** stálo 1,3 tis. Kč a **OLT** stálo 2,1 tis. Kč.

WiGig

Pro technologii WiGig byla vybrána značka MikroTik i kvůli výběru AP pro měření přenosových parametrů (viz kapitola 4.1). Vysílací AP byly vybrány 3 typy: RBLHGG-60adkit [9] pro PtP spoje, wAP 60G AP [8] se směrovostí 60° a wAP 60Gx3 AP [7] se směrovostí 180°. CPE jednotka byla vybrána RBLHGG-60ad [10]. Jako datová jednotka byla vybrána Router RB4011iGS+RM [15] s PoE panelem od MaxLink Gigabit POE panel 12 portů [11]. Z důvodu zálohy je vybrán jako UPS (Uninterruptible Power Supply/Source - bez výpadkový zdroj) od firmy DELTA spínaný zdroj na 24 V, 155 W [12] se záložními olověnými bateriemi 12 V od výrobce MaxLink s kapacitou 12 Ah [13] a s kapacitou 28 Ah [14].

Cena byla: **AP PtP** - 7,3 tis. Kč; **AP PtMP 60°** - 3,2 tis. Kč; **AP PtMP 180°** - 4,9 tis. Kč; **CPE** - 3,7 tis. Kč; **router** - 4,9 tis. Kč; **PoE** - 2,4 tis. Kč; **UPS** - 1,2 tis. Kč; **baterie 12 Ah** - 600 Kč; **baterie 28 Ah** - 1,4 tis. Kč.

Kapitola 6

Výběr technologií pro atrakční lokalitu

V této kapitole budou pro jednotlivé lokality určeny průměrné vzdálenosti mezi objekty, potřebné délky výkopů pro kabelové technologie a hustota BJ na km². Z těchto údajů se bude tvořit ekonomická rozvaha vhodnosti jednotlivých technologií pro dané lokality.

Pro zobrazení vzorových lokalit (umístěné v příloze D) byl použit mapový prohlížeč dostupný online [Mapy.cz](https://www.mapy.cz). Byly použity dva náhledy. V prvním náhledu je lokalita zobrazena na mapě ve větším měřítku, aby bylo možné lépe lokalizovat místo. V druhém náhledu je lokalita zobrazena s detailem na plochu dané lokality. Pro zjištění počtu BJ v lokalitě byl použit interní firemní systém, který využívá dat z katastrů nemovitostí. V práci nebyly použity osobní informace o vlastnících nemovitostí a účastnících.

V rámci různorodosti všech lokalit je v této práci uvažován již realizovaný přípojný bod uprostřed lokality, protože u jednotlivých případů může být reálný přípojný bod velice vzdálený. U jedné lokality může být velmi blízko či již v místě lokality připraven stejně, jak se v této práci předpokládá, anebo je zapotřebí provést dlouhé výkopy řádově kilometrů pro napojení lokality na přípojný bod. Tento proces je ve většině případů prováděn pomocí optického kabelu. Tímto krokem se v práci zajišťuje stejná počáteční podmínka.

S ohledem na různost lokalit jsou vybrané vzorové lokality pro účely rozvah a lokality v jiných místech mohou mít rozdílné parametry. Nelze sumarizovat výsledky pro všechny lokality a je potřebné vždy danou lokalitu posuzovat individuálně, nehledě na situace s technickou připraveností lokalit.

6.1 Typy atrakčních lokalit

V první části typů atrakčních lokalit byla vybrána jedna lokalita jako vzorová a na této lokalitě byl proveden výzkum, ve kterém se zjistily potřebné parametry lokality.

6.1.1 Vysoké bytové domy

Vysoké BD obsahují velkou koncentraci BJ na jednu budovu/vchod. Typicky se jedná o budovy s počtem bytů vyšším než 10 na vchod.

Ve vzorové lokalitě byly umístěny tři řadové BD, které měly 6 pater po 7 vchodech. Dva BD byly 8 patrové po 7 vchodech a jeden BD měl 8 pater po 4 vchodech. Dohromady se v těchto budovách nachází 837 BJ na ploše zhruba 65 tisíc m². Průměrný počet BJ na plochu vychází přibližně 12 791 BJ na km². V průměru obsahuje každý vchod 21,5 BJ a v ulici je obsaženo přibližně 120 BJ.

Vzorová lokalita pro vysoké BD byla vybrána oblast v městské části Kamýk v hlavním městě Praze a je zobrazena na obrázku [D.1](#), detailně na obrázku [D.2](#).

6.1.2 Nízké bytové domy

Pro nízké BD je typický počet bytů na vchod menší než 10. Jedná se o velkou koncentraci bytů oproti RD (rodinné domy), ale je nižší než ve vysokých BD.

Jako vzorová lokalita byl vybrán souhrn řadových BD, které obsahují 8 BJ na vchod, a jsou umístěny do 6 řad po 6 vchodech. Lokalita se rozprostírá na ploše 38.5 tisíc m² a vychází přibližně 7 840 BJ na km².

Vzorová lokalita pro nízké BD byla vybrána oblast v městské části Strašnice v hlavním městě Praze a je zobrazena na obrázku [D.3](#), detailně na obrázku [D.4](#).

6.1.3 Řadové rodinné domy

Řadové RD mají typicky nízké vzdálenosti mezi vchody jednotlivých RD, které na sebe přímo navazují. Je tedy vyšší hustota BJ oproti situaci, kdy by byly RD postaveny s rozestupy.

Ve vzorové lokalitě pro řadové RD bylo obsaženo 242 RD na ploše přibližně 120 tisíc m² a vycházela hustota 2 014 BJ na km².

Vzorová lokalita pro řadové RD byla vybrána část obce Kuřim v okrese Brno - venkov a je zobrazena na obrázku [D.5](#), detailně na obrázku [D.6](#).

6.1.4 Rodinné domy

Lokalita s RD jsou typické s rozložením, kdy RD jsou vybudované uprostřed pozemku a nesousedí fyzicky s okolními obydlými objekty. Mezi jednotlivými vchody RD bývají delší rozestupy oproti řadovému rozložení RD.

V závislosti na větších pozemcích jednotlivých RD bylo ve vzorové lokalitě napočítáno 80 BJ na ploše 101 tis. m². Pro lokalitu RD vycházela hustota na 789 BJ na km².

Vzorová lokalita pro RD byla vybrána část nové zástavby v obci Lounňovice v okrese Praha - východ a je zobrazena na obrázku [D.7](#), detailně na obrázku [D.8](#).

6.1.5 Samoty

Umístění objektů jako samoty je význačné tím, že jednotlivé pozemky objektů jsou velmi rozsáhlé nebo na sebe přímo nenavazují. Typickým příkladem jsou především horská území, kde v lokalitě jsou rozestupy mezi jednotlivými objekty i stovky metrů.

Pro lokalitu samot bylo napočítáno 27 objektů rozprostřených na ploše 539 tis. m² a vycházela zde hustota objektů přibližně 50 BJ na km².

Vzorová lokalita pro samoty byla vybrána oblast Bystré v obci Janovice v okrese Frýdek - Místek a je zobrazena na obrázku [D.9](#), detailně na obrázku [D.10](#).

6.2 Parametry atrakčních lokalit

Vysoké BD

Vysoké BD měly v této lokalitě rozestupy přibližně 20 metrů mezi vchody, vzdálenosti mezi jednotlivými BD byly okolo 40 metrů a celá oblast pro účely připojení zemní trasou by vyžadovala výkopy v celkové délce přibližně 950 m v případě připojení každého vchodu samostatnou trasou. Tento proces je velice nákladný a proto je zde možnost vytvořit namísto napojení všech vchodů vnější trasou napojení pouze prvního vchodu a ostatní vchody napojit pomocí vnitřní trasy. Tento proces sníží potřebné vzdálenosti prováděných výkopů na hodnotu 600 m. To znamená finanční úsporu o více než polovinu na výkopové práce.

Při napojování BD přes jeden průchod pro více vchodů je zapotřebí projednat vnitřní trasu se všemi majiteli celé nemovitosti. V případě jednotných majitelů pro celý BD je celý proces jednodušší. Pokud jsou majitelé různí, může nastat situace, ve které majitelé jednoho vchodu nemusí souhlasit s vnitřní trasou a je potřeba plánovat vnější trasu. Při této situaci je vhodné mít připravené podklady pro realizaci vnější zemní trasy, která navyšuje celkové výkopové práce.

Při napojování velkého množství BJ na jeden vchod je důležitý počet BJ. V případě napojování BJ z SDF a vedením optického kabelu jsou rozhodující počty BJ 12, 24 nebo 48 BJ na vchod/napojovaný objekt. Tento počet je shodný s počtem vláken daných typů kabelů (převážně mikrokabel s ribbonovými svazky o šířce 6 vláken). V případě většího počtu BJ je potřeba použít provařovací větší skříně s vyšším profilem kabelu. Pro případ technologie FTTB (G.fast), případně využití splitteru v provařovací skříně daného vchodu je tento počet omezen na 16 BJ. Zařízení DPU je 16 výstupních portů pro G.fast a v případě většího množství BJ by bylo potřeba instalovat další zařízení, které by bylo zapojeno pouze částečně.

Pro využití připojení k internetu přes bezdrátový spoj je pro lokalitu s vysokými BD nerealizovatelné při využití čistě bezdrátového řešení (přijímací AP by bylo připojeno do účastnického zařízení na rozhraní do lokální sítě BJ). Připojení antén by bylo realizovatelné ze střešních stožárů jednotlivých BD, případně stožáru nad každým vchodem. V případě technologie WiGig je přenosová kapacita symetricky 1 Gbit/s. Záleží na poskytovateli internetu, jak bude dimenzovat dané připojení. Pro účely práce byla určena agregace pro jedno AP maximálně 10 účastníka (průměrné využití maximální kapacity spoje by bylo omezeno 100 Mbit/s na jednoho účastníka pro splnění výzvy VHCN). Dále pro lokality s BD bude potřeba zřídit vnitřní rozvody stejně jako u technologie optické nebo metalické.

Nízké BD

Nízké BD měly v této lokalitě vzdálenosti mezi vchody přibližně 16 metrů a vzdálenost mezi BD byla přibližně 50 metrů. Pro napojení celé lokality pomocí vnějších tras by bylo potřeba provést přibližně 1070 metrů výkopů. V případě využití vnitřních tras v objektech jako u vysokých BD by bylo potřebné provést výkopy o délce přibližně 450 metrů. Využitím vnitřních tras v objektech by došlo k úspoře nákladů za výkopové práce více než o polovinu.

Situace napojování objektů byla obdobná jako u vysokých BD, ale v tomto případě je možné využití napojení více vchodů na jeden prvek. Je např. možné napojit na jednu DPU dva vchody, protože každý ze vchodů obsahuje 8 BJ a v součtu dvou vchodů obsahují přesně potřebných 16 BJ na jedno zařízení. Pro případ napojování z vnějšího kabinetu optickým kabelem je zde možnost napojení až 3 vchodů na jeden 24 vláknový optický kabel. Pro využití 48 vláknového kabelu je možné napojení celého bloku BD.

Pro napojení objektů pomocí bezdrátového spoje platí stejné podmínky jako v případě vysokých BD.

Řadové RD

Pro lokalitu řadových RD vycházela průměrná vzdálenost mezi RD 20 metrů a napojení celé lokality by vyžadovalo výkopy o délce 3634 metrů. Pro RD nelze využít společného vedení vnitřními prostory objektů, tudíž nelze využít snížení délek výkopů.

Pro využití bezdrátové technologie pro napojení této lokality je již možné využití AP pro napojení koncového zařízení do lokální sítě. Důvodem je jedna BJ v jednom objektu a není nutné rozvádět připojení z AP po objektu pro napojení více BJ. Jedná se však o napojení velkého množství objektů v úzkém okruhu a je potřeba rozvázně naplánovat jednotlivé sektory AP, kam budou signál distribuovat. Platí zde omezení maximálně napojených 8 klientských AP na jedno vysílací AP.

RD

V lokalitě RD bylo spočítáno potřebných výkopů 3280 metrů pro napojení celé lokality. Vzdálenost mezi jednotlivými RD vzrostla na přibližně 40 metrů. Pro RD platí stejná situace jako byla popsána výše, jak pro výkopy, tak pro bezdrátové připojení. Na rozdíl od řadových RD není hustota objektů na plochu tak výrazná a plánování jednotlivých sektorů je pro tento případ jednodušší. Oblast je pro maximální efektivní dosah technologie WiGig (stanoven na 200 m podle výrobce [8]) rozložená ideálně. Objekty nejsou v lokalitě blízko od sebe, ale vzdálenost pro připojení na centrální body v lokalitě nejsou delší než 200 metrů.

Samoty

Pro lokalitu samot vychází délka výkopů přibližně na 4 km. Vzdálenosti jednotlivých objektů od sebe jsou natolik velké, že by bylo potřeba pro napojení lokality na technologii WiGig více přípojních míst. V případě jednoho vysílacího místa by vycházely vzdálenosti pro nejvzdálenější objekty nad doporučených 200 metrů a nebylo by zaručené kvalitní připojení k internetu. V případě technologie G.fast se jedná o nadměrné vzdálenosti pro připojení, její maximum je přibližně 250 metrů.

Porovnání parametrů technologií

V tabulce 6.1 jsou vypsány vypočítané parametry vybraných lokalit.

Parametry	Vysoké BD	Nízké BD	Řadové RD	RD	Samoty
Rozloha [m ²]	65 437	38 521	120 158	101 341	539 000
Počet BJ	837	302	242	80	27
Hustota [BJ/km ²]	12 790	7 840	2 014	789	50
Počet vchodů	39	38	239	80	27
Počet vchodů v jednom bloku BD	7	6	-	-	-
Počet bloků	7	6	24	20	20
Počet BJ na vchod	21,5	8	1	1	1
Počet BJ na blok	119,5	50,3	10	4	1,35
Průměrné výkopy ke vchodům [m/BJ]	1,14	3,54	15,02	42,50	147,41
pro vnitřní trasy	0,63	1,49	-	-	-
Délka výkopů pro průměrnou lokalitu na km ²	14 518	27 777	30 243	33 550	7 384
pro vnitřní trasy	8 100	11 682	-	-	-

Tabulka 6.1: Porovnání parametrů vzorových atrakčních lokalit

Rozloha lokality byla odečtena z mapového prohlížeče [33]. Tento údaj je uveden v obrázcích v příloze D v detailním zobrazení lokality. Hodnota rozlohy lokality je uváděna v m².

Počet BJ je parametr, který je převzatý z vytyčené lokality z parametru rozlohy. Udává počet BJ v lokalitě.

Hustota udává počet BJ na km². Slouží pro porovnání, kolik BJ by při aplikaci vzorové lokality vycházelo při realizaci dané lokality na ploše 1 km².

Počet vchodů, počet bloků a počet vchodů v jednom bloku BD jsou parametry udávající celkový počet vchodů ve vybrané lokalitě, kolik bloků je v lokalitě obsaženo a průměrný počet vchodů na jeden blok.

Počet BJ na vchod a počet BJ na blok jsou průměrné hodnoty BJ na vchod nebo na blok pro vzorové lokality.

Průměrné výkopy ke vchodům je parametr uvádějící poměrnou délku výkopů celé lokality na jednu BJ pro vnější výkopy (pro výkop ke každému vchodu) a poté pro délku výkopů s možností vedení kabelů přes vnitřní trasy objektů (především BD) v metrech výkopů na jednu BJ.

Délka výkopů pro průměrnou lokalitu je přepočtená délka výkopů pro vzorovou lokalitu, která by se rozprostírala na ploše 1 km² pro případ vnějších tras výkopů i pro využití vnitřních tras v objektech.

6.3 Ekonomická rozvaha napojovaných lokalit

V předchozích sekcích byly pro lokality vypočítány a určeny parametry potřebné k ekonomické rozvaze. Pro ekonomickou rozvahu byla zavedena vstupní podmínka taková, že do všech lokalit je již přiveden dostatečně kapacitní optický kabel, který napojuje aktivní technologie v potřebném místě výstavby či instalace. Další podmínkou je v rámci rozvahy předpoklad výstavby pouze přístupové sítě, výstavbou lokální sítě se tato práce nezabývala.

V první části rozvahy byly lokality napojeny jako nově budované objekty bez příslušné infrastruktury (provedení výkopů, instalace vnitřních rozvodů, příprava stožárů pro antény apod.). V druhém kroku byly v rozvaze zahrnuty možné varianty technické připravenosti v lokalitách, např. již vybudované metalické rozvody.

Pro ekonomickou rozvahu byly uvažovány investice na zhotovení internetového připojení v lokalitě na jednu BJ jako rozhodující. Pro bezdrátovou technologii je nutné připočítat do měsíčních nákladů nájem za umístění antén. V případě infrastruktury nebyly počítány nutné zásahy pro opravu závad. Aktivní technologie vyžaduje obnovu po 8 letech používání.

Porovnání investic na výstavbu lokalit s investicemi za uplynulých 10 let od výstavby přístupové sítě (počítáno s investičními náklady na výstavbu lokality, technickou obměnu zařízení a nájem) bylo rozhodující pro ekonomickou rozvahu s výhledem investic do budoucna. Nájem i obnovy aktivní technologie byly počítány s konstantními cenami bez zahrnutí změny technologií nebo nárůstů cen nájmu. Předpokládá se stejný typ, jaký byl použit pro výstavbu lokality za stejnou pořizovací cenu. Výpočty byly provedeny v programu Excel, soubory .xlsx jsou součástí elektronických příloh k této práci.

Vysoké BD

Pro vysoké BD vycházela délka výkopů na 950 m pro vnější napojovací trasy a přibližně 530 m pro trasy s využitím vnitřních prostor BD. Pro optickou i metalickou přístupovou síť by bylo potřeba instalovat vnitřní rozvody z daného přenosového média. BD ze vzorové lokality obsahují celkové množství 837 BJ. Z výpočtů vychází průměrně 21,5 BJ na vchod.

Pro technologii **G.fast** je datový prvek DPU vybavený 16 porty pro napojení metalické infrastruktury (tzn. napojení maximálně 16 BJ na jedno DPU). Pro případ této lokality je zapotřebí využití 2 DPU pro napojení jednoho vchodu. Ve vzorové lokalitě je celkový počet 39 vchodů. Při výpočtu ceny přípojné aktivní technologie vychází: $2 \cdot 39 \cdot 65\,000 = 5\,070\,000$ Kč. Pořízení CPE pro napojení objektů vychází $3\,250 \cdot 837 = 2\,720\,250$ Kč. Celkově za aktivní technologii G.fast vycházela investice 7 790 250 Kč. Každé DPU vyžaduje připojení jedním vláknem, na vchod vychází připojení 2 vláken. Výpočty pro přívodní optická vlákna jsou podobné s připojováním pomocí technologie GPON. Namísto využití OK (Optický Kabel) s kapacitou 24 vláken je potřeba využití FU (Fibre Unit - vláknová jednotka) se 2 vlákny.

V případě technologie **GPON** jsou 2 varianty napojení na vnitřní rozvody BD. První je vedení kapacitních optických kabelů od centrálního prvku v lokalitě k provařovacím skříním jednotlivých vchodů. Varianta s vnějšími výkopy je znázorněna na obrázku E.1 a s využitím vnitřních tras v objektech je zobrazena na obrázku E.2. Druhou variantou je využití technické místnosti v suterénu každého bloku pro výstavbu tzv. mini SDF, do kterého bude přivedená potřebná kapacita vláken (viz obrázek E.3). V případě vzorové lokality se jedná

průměrně o 120 BJ na jeden blok BD, tzn. využití dvou splitterů 1:64 na jeden blok BD. Do každého z mini SDF bylo potřeba přivést 2 vlákna z centrálního prvku. Typ řešení s mini SDF využívá úsporu investic v dimenzování připojení na vnitřní rozvody a namísto použití 120 vláken z centrálního prvku vyžaduje použití 2 vláken (a s tím spojené dimenzování plastové infrastruktury pro vedení potřebného počtu vláken/kabelů do objektu).

Pro obě varianty řešení technologie GPON se jedná napojení optickým vláknem z centrálního prvku vzorové lokality. Jako aktivní technologie pro datový prvek bylo použito jedeno OLT s 8 porty za 45 tis. Kč. Při použití vydělovacího poměru 1:128 je maximální počet napojených uživatelů 1024. Pro napojení BJ jsou možné dvě varianty: použití ONU ($837 \cdot 1\,300 = 1\,088\,100$ Kč) nebo ONT ($837 \cdot 2\,100 = 1\,757\,700$ Kč). Záleží na typu LAN napojovaných BJ, ale nejčastěji bývá použito ONT kvůli WiFi rozhraní. V případě, že si zákazník bude pořizovat vlastní router je dostatečná varianta s ONU. V rozvaze se počítalo s oběma variantami, ale rozdíl je pouze v ceně za BJ vyšší o 800 Kč pro ONT.

Využití čistě technologie **Wigig** není pro tuto lokalitu možné. Jediným možným způsobem, jak připojit vzorovou lokalitu, bylo vytvoření stožárů nad jednotlivými vchody a využití PtP komunikace s datovou technologií umístěnou v centru lokality. Tento typ napojení vyžadoval umístění 39 PtP antén na centrální stožár v lokalitě a výstavbu 39 stožárů nad jednotlivými vchody. Tento proces by stál přibližně 1 315 700 Kč. Po připojení všech vchodů přenosovou rychlostí 1 Gbit/s bylo potřeba zajistit distribuci vnitřními rozvody do jednotlivých BJ.

Varianta **WiGig over GPON** využívá technologii GPON pro distribuci internetového připojení do jednotlivých BJ daného vchodu BD. Je zapotřebí výstavba optických VR s instalací datových prvků v každém vchodě (39 OLT se 4 porty) a potřebným počtem ONT/ONU. Aktivní technologie v tomto případě vycházela na 5 354 900 Kč.

Pro variantu s **Wigig over G.fast** platil podobný postup a fakticky odpovídal ceně technologie za napojení lokality technologií WiGig + potřebných DPU a CPE v případě varianty napojení technologií G.fast. Cena za aktivní technologii vycházela na 9 105 950 Kč.

Pro spočítání všech investic na výstavbu lokality bylo pro dané typy zapotřebí přičíst náklady za VR a přívodní OK do suterénu objektů. Náklady na vybudování VR byly dány průměrnou hodnotou výstavby MET VR za 3 900,- Kč/m a OPT VR za 3 300,- Kč/m. Pro výstavbu přívodního OK bylo potřeba zahrnout délku výkopů, délku pro MT (mikrotrubičky) a délku OK s náklady na materiál a montáž, společně s odměnou pro projektanta a GEO (geodetické) předměření lokality. Pro jednotlivé lokality bylo potřeba zahrnout i přípravu suterénu (výstavbu racku, pro aktivní technologii dovést nízkonapěťovou přípojku a její projekci s cenou 30 tis. Kč/ks).

Výsledky počítaných technologií pro lokalitu vysokých BD jsou uvedeny v tabulce [B.11](#).

Nízké BD

Napojování lokality s nízkými BD bylo řešeno podobně jako lokalita s vysokými BD. Ve srovnání se jedná o lokalitu s nižším počtem BJ na vchod (8 BJ na vchod) oproti lokalitě s vysokými BD. Celkové množství BJ v lokalitě je 302 na 38 vchodů. Délka výkopů pro vnější trasy přívodních kabelů byla 1 070 metrů (viz obrázek [E.4](#)) a v případě využití vnitřních tras objektů se jedná o 450 metrů výkopových prací (viz obrázek [E.5](#)). V této lokalitě lze také uplatnit topologii s využitím mini SDF, schéma napojení je zobrazeno na obrázku [E.6](#).

Pro technologii **G.fast** bylo možné napojit dva vchody na jedno DPU a celková cena na přípojnou aktivní technologii vycházelo $\frac{38}{2} \cdot 65\,000 = 1\,235\,000$ Kč. Pořízení potřebného počtu CPE vycházelo na $3\,250 \cdot 302 = 981\,500$ Kč. Dohromady za aktivní technologii technologie G.fast pro nízké BD vycházela cena 2 969 223 Kč s montáží a projektovou dokumentací na nízkonapěťovou přípojku.

Technologie **GPON** pro tuto lokalitu potřebovala pouze jedno OLT se 4 porty (cena 28,5 tis. Kč). Pro připojení BJ k internetu bylo potřeba investovat do 302 ONT (634 200 Kč) nebo ONU (392 600 Kč).

Případ s technologií **WiGig** byl stejný jako v lokalitě s vysokými BD. Je potřeba využít vnitřních rozvodů používající technologii GPON nebo G.fast. Pro případ **Wigig over GPON** vycházela cena za technologii na 4 141 500 Kč. Varianta s **Wigig over G.fast** vycházela cena za technologii na 4 253 523 Kč.

Výsledky počítaných technologií pro lokalitu nízkých BD jsou uvedeny v tabulce [B.12](#).

Řadové RD

Pro lokality s RD již nebylo možné využívat suterény objektů pro vedení vnitřních OK, protože objekty na sebe nenavazovaly pro snížení výkopových prací. Každý objekt již byl po jedné BJ, tzn. že napojování objektů bylo prováděno vždy jedním vláknem/párovým kabelem/CPE AP. V lokalitě bylo 242 BJ, které bylo potřeba napojit. Výkopové práce byly potřebné provést v délce 3634 metrů.

Pro technologii **G.fast** by bylo potřeba zhotovit 2 kabinety, ve kterých by byla aktivní technologie. Docházelo zde ke vzdálenostem delším jak 250 m a pro technologii G.fast je tato vzdálenost hraniční. Na celkový počet 242 BJ bylo potřeba zřídit 16 DPU, 2 kabinety pro rDSLAM a zřídit NN (nízkonapěťovou) přípojku pro oba kabinety. Společně s CPE zařízeními byla cena za technologii stanovena na 1 952 616 Kč.

V případě technologie **GPON** byly možné dvě varianty výstavby topologie sítě: jednostupňové nebo vícestuňové splitterování lokality. V obou případech byla použita aktivní technologie stejná. 1 OLT se 4 porty a 242 jednotek ONU/OLT. Pro případ použití jednotek ONU vycházela cena technologie na 343 100 Kč a pro variantu s ONT vycházela cena na 536 700 Kč.

U varianty s centrálním prvkem (viz obrázek [E.7](#)) je použit jeden SDF, ve kterém je umístěna aktivní technologie se splitterama, na které jsou napojeny jednotlivé BJ. Pro napojení lokality touto topologií by bylo potřeba využít přibližně 70 km MT a skoro 75 km FU. Tato topologie by vycházela na 3 770 490 Kč. Při využití topologie s vícestuňovým splitterováním je použito 8 pilířků PON 32 se splitterem 1x32 a bylo potřeba přivést ke každému jedno vlákno. Rozdělení lokality pro napojení na jednotlivé pilířky je zobrazeno na obrázku [E.8](#). Pro tuto variantu je potřeba přibližně třetinových délek MT i FU a cena pro tuto topologii vycházela 2 646 933 Kč. Důvodem, proč cena za druhý typ topologie není třetinová, bylo použití stejných vzdáleností výkopů, které stály necelé 2 miliony.

Pro napojení lokality technologií **WiGig** nebylo potřeba využít vnitřních rozvodů jako v případě BD, ale dostačovalo řešení s napojením antény na střeších RD. Pro tuto aplikaci byly použity CPE AP na straně RD a na straně připojovací byl použit stožár s 6 AP 60° vyzářováním. Pro tento typ AP je limitní připojení 8 CPE na jedno AP. Na jeden stožár

je možné připojit 48 BJ. Pro tuto lokalitu je zapotřebí vybudovat 6 stožárů s využitím alespoň 31 AP. Za technologii WiGig vycházela investice za 1 865 500 Kč.

Výsledky počítaných technologií pro lokalitu řadových RD jsou uvedeny v tabulce [B.13](#).

RD

V lokalitě s RD bylo 80 BJ a délky výkopů dosahovaly 3 280 metrů.

Při napojení technologií **G.fast** by bylo potřeba pořídit 6 DPU v jednom kabinetu, protože vzdálenosti pro tuto lokalitu jsou maximálně do 240 metrů. Cena za technologii by vycházela na 777 810 Kč.

Pro technologii **GPON** se v této lokalitě neuplatní dvoustupňové splitterování a všechny BJ jsou napojeny z jednoho distribučního místa. Pro tuto lokalitu by stačil pouze jeden port z OLT, proto je použit OLT se 4 porty. Cena za technologii by vycházela pro lokalitu s RD na 135 500 pro variantu s ONU a 196 500 Kč za variantu s ONT.

Technologie **WiGig** v této lokalitě byla dimenzována na 3 AP se 60° na jeden stožár, protože se jedná o řidší zástavbu oproti variantě s řadovými RD. Z tohoto důvodu byl v lokalitě navržena výstavba 4 stožárů. Cena za napojení technologií WiGig by vycházelo v lokalitě RD na částku 770 600 Kč.

Výsledky počítaných technologií pro lokalitu RD jsou uvedeny v tabulce [B.14](#).

Samoty

Pro lokalitu samot byly typické velké vzdálenosti, kde nebyly výjimkou vzdálenosti přes 1 km. Z tohoto důvodu nebylo možné použít technologie G.fast (maximální dosah okolo 250 metrů) ani WiGig (doporučené maximální vzdálenosti 200+ metrů). Tyto vzdálenosti by si vyžadovaly výstavbu většího množství prvků, které by měly kratší vzdálenosti pro napojení lokalit. Tato řešení by bylo možné využít v rámci jedné lokality, ale jako komplexní řešení není vhodné. S ohledem na vzdálenosti je jediná vhodná technologie na připojení GPON.

Technologie **GPON** by zde vyžadovala náklady na technologie v hodnotě 63 600 Kč. V rámci této lokality by bylo potřeba použít větší množství výkopů, MT i OK oproti lokalitě s RD. Množství výkopů vycházelo na 3 980 metrů, délky MT by dosahovaly okolo 18 km a OK necelých 19 km.

Výsledky počítaných technologií pro lokalitu samot jsou uvedeny v tabulce [B.14](#). Byly zde uvedeny i hodnoty pro napojení technologií G.fast i WiGig, i když reálné vzdálenosti pro tyto technologie nejsou vhodné.

Pro napojení typových lokalit samot by byla varianta připojení pomocí fixní LTE-A sítě, která dosahuje relativně vysokých přenosových rychlostí při použití na větší vzdálenosti. Toto řešení není předmětem této práce, proto nebylo více rozebíráno.

6.3.1 Technická připravenost lokality

V případě technické připravenosti lokalit je předpokládána již hotová MET infrastruktura (VR BD, rozvody ze stávající telefonní sítě, apod.), která je možná použít pro vedení technologie G.fast.

V případě lokalit s BD by nebylo potřeba zhotovení MET VR a bylo by možné napojení BD realizovat s pořízením potřebné technologie a přírodního OK. Pro lokality s RD by poté nebylo nutné provádět výkopy spojené s pokládkou MET infrastruktury a bylo by nutné pořízení technologie a napojení daných rozvodů. Výpočty pro lokality s připravenou MET infrastrukturou jsou uvedeny v tabulce [B.15](#).

Výběr technologie na základě investice na výstavbu lokalit

V tabulkách uvedených u každé z lokalit je soupis investic za vybudování přístupové sítě v celé lokalitě a průměrná cena investice na BJ za dané technologie. V rozvaze investora rozhoduje převážně průměrná cena za jednu BJ.

Výsledný výběr technologií pro lokality na základě nejnižší ceny za BJ:

- **lokalita s vysokými BD:** varianta GPON s využitím vnitřních tras v objektech, mini SDF v suterénech objektů a jednotek ONU: náklady 5 608 Kč/BJ
- **lokalita s nízkými BD:** stejná varianta, jako pro vysoké BD: náklady 6 378 Kč/BJ
- **lokalita s řadovými RD:** varianta WiGig: náklady 7 709 Kč/BJ
- **lokalita s RD:** varianta WiGig: náklady 9 633 Kč/BJ.
- **lokalita se samotami:** nebylo možné použít v rozumné míře technologie WiGig ani G.fast (velké vzdálenosti mezi objekty) a pro technologii GPON by společně s výkopy tras pro napojení vycházela průměrná cena na 106 982 Kč/BJ.

6.3.2 Investice za uplynulých 10 let

Pro porovnání, jak se změní náklady za jednotlivé technologie v případě bezporuchového provozu a výměny aktivní technologie po 8 letech, byl vytvořen výpočet při aplikování nájmu a investic za technologie na 10 let. Byl počítán nájem v hodnotě 2000 Kč měsíčně za použití místnosti/stožáru. Tento aspekt se týkal především bezdrátové technologie, která využívala v lokalitě velké množství stožárů. Soupis investic za období 10 let je uveden v tabulkách [B.16](#), [B.17](#), [B.18](#), [B.19](#) a pro připravenou MET infrastrukturu je viz tabulka [B.20](#).

Výsledný výběr technologií s nejnižšími cenami za BJ s investicemi na 10 let:

- **lokalita s vysokými BD:** varianta GPON: náklady vzrostly na 6 962 Kč/BJ
- **lokalita s nízkými BD:** varianta GPON: náklady vzrostly na 7 772 Kč/BJ
- **lokalita s řadovými RD:** varianta WiGig: náklady vzrostly na 21 368 Kč/BJ, vybrána varianta GPON s využitím vícecestup. splitterováním: náklady 14 616 Kč/BJ
- **lokalita s RD:** varianta WiGig: náklady vzrostly na 28 265 Kč/BJ, vybrána varianta G.fast s postavenou MET infrastruk.: náklady 19 445 Kč/BJ
- **lokalita se samotami:** varianta GPON: náklady 109 338 Kč/BJ.

Kapitola 7

Závěr

Tato práce se věnovala porovnání technologií, které splňovaly podmínku přenosové rychlosti alespoň 1 Gbit/s. Popisu a porovnání technologií se věnovala kapitola 3 – Přístupová síť a byla zde vytvořena tabulka 3.1, ve které byly uvedeny parametry použité pro hodnocení technologií.

Kapitola 4 – Měření se zabývala měřením dvou technologií pro účely zpřesnění parametrů – WiGig a GPON. Sekce 4.1 se věnovala technologii WiGig, byla zde instalována sestava dvou antén na střeše ČVUT, fakulty elektrotechnické a byly měřeny parametry pomocí dvou měřících zařízení F-Tester. Byla zjištěna maximální propustnost 1 Gbit/s, která byla omezena použitím 1 GE portu pro přenos komunikace. Na vzdálenost 51 metrů nebylo zaznamenáno pro přímé natočení, že by spoj byl náchylný na atmosférické jevy. Pro zjištění závislosti byla jedna z antén vyosena přibližně o 80°, aby byl simulován vyšší útlum a AP byly nuceny použít robustnější modulace, které využívaly nižší přenosovou rychlost. Závislost byla potvrzena při srážkách o hodnotě přibližně 11 mm/hod, přenosové parametry byly na třetinové úrovni oproti stavu bez srážek. Průběh přenosové rychlosti v průběhu srážek byl zobrazen na obrázku 4.8.

Sekce 4.2 se věnovala technologii GPON, byla zde vytvořena měřící sestava, která využívala stejné parametry pro měření, jaký byly použity pro měření technologie WiGig. Po sestavení a zprovoznění sestavy bylo zjištěno, že spojení mezi F-Testerem a ONU nebylo sestavené správně. Propojené porty se nedomluvili automaticky pomocí funkce *auto-negotiation* a vzniklo zde „úzké hrdlo“. Za podmínky testování se stejnými parametry nebylo měření úspěšné.

Kapitola 5 – Porovnání technologií se věnovala ohodnocení technologií podle jejich parametrů přenosu. Bylo zde použito hodnocení od 1 do 5, kde vyšší číslo znamenalo lepší hodnocení. S nejlepším hodnocením dopadla technologie XGS-PON s hodnocením 4,13 a byla vybrána jako optická technologie pro ekonomickou rozvahu. Jako metalická technologie byl vybrán s hodnocením 3,13 G.mgfast a jako bezdrátová technologie byl s hodnocením 2,67 vybrán WiGig. S ohledem na dostupnost technologií pro ekonomickou rozvahu nebylo možné použít vybrané technologie XGS-PON a G.mgfast, proto byly vybrány jako zástupce technologie GPON a G.fast.

V sekci 5.3 byly sepsány náklady pro jednotlivé aspekty, které byly použity pro ekonomickou rozvahu pro vzorové lokality. Jednalo se především o cenu materiálu a montáže daných prvků, aktivní technologie nebo přípravy pro instalaci bezdrátových spojů.

S vybranými technologiemi z předchozí kapitoly byla v kapitole 6 – [Výběr technologií pro atrakční lokalitu](#) provedena ekonomická rozvaha pro všechny vzorové lokality. Jednalo se o lokality s vysokými bytovými domy, s nízkými bytovými domy, s řadovými rodinnými domy, s lokalitou rodinných domů a lokalitou samot. V první části byly sepsány parametry jednotlivých lokalit a tyto parametry byly uvedeny v tabulce 6.1. V rámci výkopových prací vycházela v poměrné délce na BJ nejlépe lokalita s vysokými BD, ve kterých byla vysoká koncentrace BJ na vchod. Pro variantu s využitím vnitřních tras v objektech vycházelo 0,63 m/BJ výkopů. V případě lokality samot vycházely největší poměrné délky výkopů na BJ a to v hodnotě 147,41 m/BJ.

Pro výpočty použité v ekonomické rozvaze bylo použito několik variant možných připojení pro dané lokality. Např. pro lokalitu s vysokými BD byly pro technologii GPON použité 3 varianty připojení: použití vnějších tras vedení OK, použití vedení vnitřních tras v objektech a použití vnitřního mini SDF. Tyto varianty byly shodné pro lokalitu s nízkými BD. Pro lokalitu s řadovými RD bylo možné použití dvou variant pro připojení pomocí technologie GPON: jedno nebo dvoustupňové splitterování. Pro všechny lokality byla použita i varianta s již vybudovanou metalickou infrastrukturou. V lokalitách s BD se jednalo o vnitřní rozvody a v lokalitách s RD bylo možné využití stávajících telefonních přípojek. V ekonomické rozvaze byly spočítány náklady na výstavbu přístupové sítě v jednotlivých lokalitách a výsledné náklady s průměrnou cenou na BJ byly uvedeny v tabulkách B.11, B.12, B.13, B.14 a B.15.

Z těchto porovnání bylo pro lokality s BD doporučeno použití technologie GPON a pro lokality s RD technologie WiGig. V rámci lokality samot bylo dosaženo velkých vzdáleností (kolem 1 km) pro možnost napojení technologiemi WiGig (doporučená maximální vzdálenost od výrobce byla uvedena na 200+ m) a G.fast (maximální překlenutelná vzdálenost odpovídá 250 m). Pro případ napojení technologií GPON vycházela cena napojení na částku 106 982 Kč/BJ, která byla velmi nákladná pro jakéhokoliv internetového poskytovatele.

V dalším porovnání byl zahrnut i provoz za 10 let, ve kterém se uplatnila investice za výstavbu, výměna technologie po 8 letech a nájem za využití místo pro stožáry/místnosti. Touto vlastností byla poznamenána především technologie WiGig, která využívá velké množství AP. V porovnání s počáteční investicí byly investice po uplynutí 10 let přibližně 3 krát vyšší. V případě výběru technologie na porovnání investic po 10 letech by se změnila v lokalitě s řadovými RD z technologie WiGig na GPON s využitím dvoustupňového splitterování (změna nákladů by činila za WiGig 21 368 Kč/BJ a za GPON 14 616 Kč/BJ). Změna by se dotkla také lokality s RD, kde by z původně vybrané technologie WiGig (28 265 Kč/BJ) byla vybrána technologie G.fast s již postavenou metalickou infrastrukturou (19 445 Kč/BJ).

Pro lokalitu samot byla doporučena technologie fixního připojení LTE-A, která by byla schopná distribuovat připojení na větší vzdálenosti, ale s nižší přenosovou rychlostí. Výpočet investice za výstavbu tohoto typu přístupové sítě není účelem této práce.

Výsledky této práce potvrdily očekávané výsledky ekonomické rozvahy v rámci cen investic za jednotlivé typové lokality.

Literatura

- [1] ABDULSALAM GHALIB ALKHOLIDI, K. S. A. *Free Space Optical Communications — Theory and Practices* [online]. 2014. [cit. 11. 03. 2020]. Dostupné z: <<https://www.intechopen.com/books/contemporary-issues-in-wireless-communications/free-space-optical-communications-theory-and-practices>>.
- [2] CISCO. *Configuring and Troubleshooting Ethernet 10/100/1000Mb Half/Full Duplex Auto-Negotiation* [online]. [cit. 5. 05. 2020]. Dostupné z: <<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/lan-switching/ethernet/10561-3.html>>.
- [3] DISCOMP. *UBNT LBE-5AC-Gen2 - LiteBeam 5AC Generation 2* [online]. [cit. 03. 02. 2020]. Dostupné z: <<https://www.discomp.cz/default.asp?cls=stomitem&stiid=81115&whisperword=litebeam205ac>>.
- [4] DISCOMP. *Ubiquiti UF-OLT-4 - U Fiber OLT, 4x GPON* [online]. [cit. 9. 05. 2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/ubiquiti-uf-olt-4-u-fiber-olt-4x-gpon_d84763.html>.
- [5] DISCOMP. *Ubiquiti UF-OLT - U Fiber OLT, 8x GPON* [online]. [cit. 9. 05. 2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/ubiquiti-uf-olt-u-fiber-olt-8x-gpon_d81977.html>.
- [6] DISCOMP. *Ubiquiti UF-LOCO - U Fiber LOCO* [online]. [cit. 9. 05. 2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/ubiquiti-uf-loco-u-fiber-loco_d84762.html>.
- [7] DISCOMP. *MikroTik wAP 60Gx3 AP, RBwAPG-60ad-SA, 60GHz, L4, Access Point* [online]. [cit. 9. 05. 2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/mikrotik-wap-60gx3-ap-rbwapg-60ad-sa-60ghz-l4-access-point_d90383.html>.
- [8] DISCOMP. *MikroTik wAP 60G AP, RBwAPG-60ad A, 60GHz, L4, Access Point* [online]. [cit. 9. 05. 2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/mikrotik-wap-60g-ap-rbwapg-60ad-a-60ghz-l4-access-point_d84405.html>.
- [9] DISCOMP. *MikroTik RBLHGG-60adkit, Wireless Wire Dish, 60GHz, L3, kompletní spoj* [online]. [cit. 9. 05. 2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/mikrotik-rblhgg-60adkit-wireless-wire-dish-60ghz-l3-kompletni-spoj_d84837.html>.
- [10] DISCOMP. *MikroTik RBLHGG-60ad, Wireless Wire Dish, 60GHz, L3, jeden kus* [online]. [cit. 10. 05. 2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/mikrotik-rblhgg-60ad-wireless-wire-dish-60ghz-l3-jeden-kus_d91031.html>.

- [11] DISCOMP. *MaxLink Gigabit POE panel 12 portů, 1U pro rack 19", stíněný* [online]. [cit. 9.05.2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/maxlink-gigabit-poe-panel-12-portu-1u-pro-rack-19-stineny_d52129.html>.
- [12] DISCOMP. *DELTA spínaný zdroj s funkcí nabíječky (UPS) 24V, 155W* [online]. [cit. 9.05.2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/delta-spinany-zdroj-s-funkci-nabijecky-ups-24v-155w_d82102.html>.
- [13] DISCOMP. *MaxLink olověná baterie AGM 12V 12Ah, Faston 6,3mm* [online]. [cit. 9.05.2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/maxlink-olovena-baterie-agm-12v-12ah-faston-6-3mm_d91659.html>.
- [14] DISCOMP. *MaxLink olověná baterie AGM 12V 28Ah, M6* [online]. [cit. 9.05.2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/maxlink-olovena-baterie-agm-12v-28ah-m6_d91661.html>.
- [15] DISCOMP. *MikroTik RouterBOARD RB4011iGS+RM* [online]. [cit. 9.05.2020]. Dostupné z: <https://www.discomp.cz/mikrotik-routerboard-rb4011igs-rm_d88041.html>.
- [16] E-BAND COMMUNICATIONS, L. *E-Band Communications, LLC.* [online]. [cit. 01.02.2020]. Dostupné z: <<https://e-band.com/>>.
- [17] E-BAND COMMUNICATIONS, L. *E-Link Eagle²* [online]. [cit. 01.02.2020]. Dostupné z: <https://e-band.com/wp-content/uploads/2019/08/DS-E-Link-Eagle^2_06062016.pdf>.
- [18] E-BAND COMMUNICATIONS, L. *E-Link LLEAP* [online]. [cit. 01.02.2020]. Dostupné z: <https://e-band.com/wp-content/uploads/2019/08/E-Link-LLEAP_datasheet_062019_press.pdf>.
- [19] FEL, C. *F-Tester NGA* [online]. [cit. 4.04.2020]. Dostupné z: <<https://f-tester.fel.cvut.cz/>>.
- [20] FRENZEL, L. *Millimeter Waves Will Expand The Wireless Future* [online]. [cit. 03.02.2020]. Dostupné z: <<https://www.electronicdesign.com/technologies/communications/article/21796260/millimeter-waves-will-expand-the-wireless-future>>.
- [21] HUAWEI. *SmartAX MA5600T* [online]. [cit. 5.05.2020]. Dostupné z: <<https://support.huawei.com/enterprise/en/access-network/smartax-ma5600t-pid-18133>>.
- [22] HUAWEI. *EchoLife HG8010H* [online]. [cit. 5.05.2020]. Dostupné z: <<https://support.huawei.com/enterprise/en/access-network/echolife-hg8010h-pid-8380489>>.
- [23] HUSTON, G. *BBR, the new kid on the TCP block* [online]. [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: <<https://blog.apnic.net/2017/05/09/bbr-new-kid-tcp-block/>>.
- [24] INMETEO, s. *Co je to meteoradar* [online]. [cit. 1.05.2020]. Dostupné z: <<https://www.meteoradar.cz/o-radaru.php>>.

- [25] ITU-T. Fast access to subscriber terminals (G.fast) – Physical layer specification. ITU-T G.9701, březen 2019. Dostupné z: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9701-201903-I/en>>.
- [26] ITU-T. Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2). ITU-T G.993.2, únor 2019. Dostupné z: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.2-201902-I/en>>.
- [27] ITU-T. Third-generation transmission systems for interactive cable television services - IP cable modems: Overview. ITU-T J.222, prosinec 2007. Dostupné z: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-J.222.0-200712-I/en>>.
- [28] JEANETTE WANNSTROM, f. G. *LTE-Advanced* [online]. [cit. 01.02.2020]. Dostupné z: <<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>>.
- [29] JUMP, L. *Introduction to DOCSIS 3.1* [online]. [cit. 18.05.2020]. Dostupné z: <<http://www.gcscte.org/presentations/2017/DOCSIS%203.1.pdf>>.
- [30] KTI. *KGC-310M-LX / C* [online]. [cit. 5.05.2020]. Dostupné z: <<https://kti.de/produkte/konverter/standalone/managed/kgc-310m-lx/c/3055>>.
- [31] LAFATA, P. Optické přístupové sítě, Pasivní optické sítě, GPON, EPON. Technical report, České vysoké učení technické v Praze, 2018.
- [32] LAFATA, P. NGA - služby a přenosové rychlosti. Technical report, České vysoké učení technické v Praze, 2018.
- [33] MAPY.CZ. *Mapy.cz* [online]. [cit. 9.05.2020]. Dostupné z: <<https://mapy.cz/zakladni>>.
- [34] MIKROTIK. *CRS112-8G-4S-IN* [online]. [cit. 4.04.2020]. Dostupné z: <<https://mikrotik.com/product/CRS112-8G-4S-IN>>.
- [35] MIKROTIK. *wAP 60G* [online]. [cit. 4.04.2020]. Dostupné z: <https://mikrotik.com/product/wap_60g_ap>.
- [36] NIX.CZ. *NIX.CZ – Neutral Internet eXchange nejen České republiky* [online]. [cit. 28.01.2020]. Dostupné z: <<https://www.nix.cz/cs>>.
- [37] ODBOR71600. *Analýza stavu rozvoje sítí NGA v ČR* [online]. [cit. 7.05.2020]. Dostupné z: <<https://www.mpo.cz/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/analiza-stavu-rozvoje-siti-nga-v-cr---252745/>>.
- [38] PAVEL LAFATA, J. V. *Optické a přístupové sítě a přípojky FTTx*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05463-5.
- [39] OBCHODU, M. *Národní plán rozvoje sítí nové generace* [online]. [cit. 24.11.2019]. Dostupné z: <<https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2016/11/NPRSNG-27-9-2016.pdf>>.

- [40] OBCHODU, M. *Národní plán rozvoje sítí nové generace* [online]. [cit. 07. 01. 2020]. Dostupné z: <<https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2016/11/NPRSNG-27-9-2016.pdf>>.
- [41] OBCHODU, M. *Plány do roku 2021* [online]. [cit. 17. 11. 2019]. Dostupné z: <<http://www.verejnakonzultace.cz/verejna-konzultace-2019/plany/>>.
- [42] OBCHODU, M. *Nerealizované plány* [online]. [cit. 25. 11. 2019]. Dostupné z: <<http://www.verejnakonzultace.cz/verejna-konzultace-2019/nerealizovane/>>.
- [43] OBCHODU, M. *Souhrnné výsledky* [online]. [cit. 23. 11. 2019]. Dostupné z: <<http://www.verejnakonzultace.cz/sber-dat/vysledky/>>.
- [44] ROUTER-SWITCH.COM. *FTTdp Network and Features* [online]. [cit. 19. 03. 2020]. Dostupné z: <<https://www.router-switch.com/solution/fttd.html>>.
- [45] UNIE, E. P. A. R. E. *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/1972* [online]. [cit. 25. 01. 2020]. Dostupné z: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L1972&from=en>>.
- [46] WIKIPEDIA. *WiGig* [online]. [cit. 9. 04. 2020]. Dostupné z: <<https://en.wikipedia.org/wiki/WiGig>>.
- [47] WIKIPEDIE.ORG. *Zisk antény* [online]. [cit. 01. 02. 2020]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zisk_antény>.
- [48] ZYXEL. *Dual-Band Wireless AC/N G.fast Gateway XMG3927-B Series* [online]. [cit. 9. 05. 2020]. Dostupné z: <https://www.zyxel.com/cz/cs/products_services/Dual-Band-Wireless-AC-N-G-fast-Gateway-XMG3927-B-Series/specifications>.
- [49] ZYXEL. *16-port Temperature-Hardened G.fast DPU with Built-in Splitter GES1116* [online]. [cit. 9. 05. 2020]. Dostupné z: <https://www.zyxel.com/cz/cs/products_services/16-port-Temperature-Hardened-G-fast-DPU-with-Built-in-Splitter-GES1116-Series/>.
- [50] TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Návod pro uživatele Portálu 60 GHz* [online]. [cit. 01. 02. 2020]. Dostupné z: <<https://60ghz.ctu.cz/navod.pdf>>.
- [51] TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Výroční zpráva Českého telekomunikačního úřadu za rok 2018* [online]. [cit. 02. 02. 2020]. Dostupné z: <<https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/273197/soubory/vz-2018-sig.pdf>>.
- [52] ČTÚ. *Podmínky a postupy podle zákona o územním plánování a stavebním řádu pro účely zavádění prvků vysokorychlostních sítí elektronických komunikací* [online]. [cit. 9. 05. 2020]. Dostupné z: <<https://www.ctu.cz/vystavba-siti/podm%C3%AAnky-postupy-%C3%BAzemni-planovani-stavebni-rad>>.
- [53] ČTÚ. *Registrované stanice* [online]. [cit. 5. 05. 2020]. Dostupné z: <<https://60ghz.ctu.cz/stanice>>.

Příloha A

Seznam použitých zkratek

10GEPON	10 Gigabit EPON
ACK	Acknowledgement
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AM	Adresní Místo
AP	Access Point
BD	Bytový Dům
BJ	Bytová Jednotka
BPSK	Binary phase-shift keying
BTS	Base Transceiver Station
CAPEX	Capital Expenditures
CATV	Cable Television
CO	Central Office
CPE	Customer-premises equipment
CWDN	Congestion Window
DMT	Discrete Multitone
DP	Distribution Point
DPU	Data Processing Unit
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
EHF	Extreme High Frequency

EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
EK	Evropská komise
EPON	Ethernet PON
FS	Fixed Service
FSO	Free Space Optic
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Cabinet
FTTdp	Fiber To The Distribution Point
FTTH	Fiber To The Home
FTTx	Fiber To The "X"
FU	Fibre Unit
FWA	Fixed Wireless Access
GE	Gigabit Ethernet
GEO	Geodetické
GEPON	Gigabit EPON
GPON	Gigabit PON
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISP	Internet Service Provider
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
LAN	Local Area Network
LFN	Long Fat Network
LTE-A	Long Term Evolution - Advanced
MIMO	Multiple Inputs Multiple Outputs
MPO	Ministerstvo Průmyslu a Obchodu
MSC	Modulation and Coding Schemes
MT	Mikrotrubička
NGA	Next Generation Access
NGN	Next Generation Network

OBAM Obytná Budova - Adresní Místo
OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OK Optický Kabel
OPEX Operating Expenses
PON Pasive Optical Network
PoP Point of Presence
PtMP Point to Multipoint
PtP Point to Point
QAM Quadrature amplitude modulation
QPSK Quadrature phase-shift keying
RD rodinné domy
rDSLAM remote Digital Subscriber Line Access Multiplexer
RSSI Received Signal Strength Indication
RTT Round Trip Time
SDF Splitter Distribution Frame
SELČ Středoevropský letní čas
SFP Small Form-factor Pluggable
SIM Subscriber Identity Modul
SIMO Single Input Multiple Outputs
SISO Single Input Single Output
SR Síťový Rozvaděč
TR Traťový Rozvaděč
UPS Uninterruptible Power Supply/Source
UTP Unshield Twisted Pair
VDMT Vectored DMT
VDSL Very High Speed Digital Subscriber Line
VHCN Very High Capacity Network
VPN Virtual Private Network

WDD Wavelength Division Duplex

WiFi Wireless Fidelity

WiGig Wireless Gigabit

WTTH Wirelles To The Home

XG-PON X Gigabit-PON

XGS-PON Symetrická X Gigabit PON

ZSJ Základní Sídelní Jednotka

ÚR Územní Rozhodnutí

ČTÚ Český Telekomunikační Úřad

Příloha B

Tabulky

B.1 Tabulka hodnot MCS indexů pro IEEE 802.11ad

MCS Index	Typ Modulace	PHY rychlost [Mbit/s]	Citlivost [dBm]	Síla Tx signálu [dB]
0 (Control-PHY)	$\frac{\pi}{2}$ BPSK	27,5	-78	-6
1	$\frac{\pi}{2}$ - BPSK	385	-68	-6
2	$\frac{\pi}{2}$ - BPSK	770	-66	-7
3	$\frac{\pi}{2}$ - BPSK	962,5	-65	-9
4	$\frac{\pi}{2}$ - BPSK	1155	-64	-10
5	$\frac{\pi}{2}$ - BPSK	1251,25	-62	-12
6	$\frac{\pi}{2}$ - QPSK	1540	-63	-11
7	$\frac{\pi}{2}$ - QPSK	1925	-62	-12
8	$\frac{\pi}{2}$ - QPSK	2310	-61	-13
9	$\frac{\pi}{2}$ - QPSK	2502,5	-59	-15
10	$\frac{\pi}{2}$ - 16-QAM	3080	-55	-19
11	$\frac{\pi}{2}$ - 16-QAM	3850	-54	-20
12	$\frac{\pi}{2}$ - 16-QAM	4620	-53	-21

Tabulka B.1: Tabulka hodnot MCS indexů a přenosových rychlostí – IEEE 802.11ad [46]

B.2 Cena za položky výstavby

Prvek montáže	Cena montáže
Metalického kabelu úložné	17,-
Metalického kabelu v kabelovodu	50,-
Trubky úložné	10,-
Trubky závlačné (4 ks)	42,-
Svazku silnostěnných trubiček	13,-
Silnostěnné trubičky	7,-
Těsnění svazku trubiček	199,-
Spojky mechanické	1600,-
Spojky bez montáže vláken	798,-
Spojky T (Y) (I)	120,-
Ochranné kabelové komory pro spojku	1412,-

Tabulka B.2: Porovnání cen montáže dílčích prvků pro sdělovací média

Prvek montáže	Cena montáže
Zafukování svazku trubiček	19,-
Zafukování/vyfukování mikrokabelu	10,-
Zafukování/vyfukování OK do 144 vl. do HDPE trubky	14,-
Zafukování/vyfukování opt. mikrokabelu 2,4,12 vláken	6,-
Zafukování nebo zatahov.OK do ost.trubek	25,-

Tabulka B.3: Ceny za zafukování

Prvek montáže	Cena montáže
Instalace optického účastnického kabinetu v budovách (FTTx)	5,-
Instalace optického kabelu v budovách	30,-
Instalace přívodu nn pro akt. prvky FTTX	770,-
Instalace trubičky v budově	20,-
Kalibrace a tlaková zkouška trubiček - stavba	1,-
Kalibrace a tlaková zkouška trubky - stavba	3,-
Montáž vnitřních telefonních rozvodů	645,-
Montáž optického účastnického zakončení ve výstavbě	230,-
Montáž optického vnitřního rozvodu v objektu do 20 m na zeď	668,-
Montáž optického vnitřního rozvodu v objektu do 20 m pod omítku	1470,-
Montáž optického vnitřního rozvodu v objektu nad 20 m na zeď	1327,-
Montáž optického vnitřního rozvodu v objektu nad 20 m pod omítku	2867,-
Montáž rozvaděče optického	500,-
Montáž samonosného optického kabelu nebo trubičky	14,-
Montáž samonosného metalického kabelu	27,-
Montáž spojky nadzemní	1670,-
Montáž stojanu pro optický rozvaděč	1350,-
Montáž trubky pro kabelové vedení v budovách	24,-
Montáž vnitřního kabelu pro síť LAN	18,-
Montáž zásuvky sítě LAN	178,-
Příprava trasy s lištami na zeď pro síť LAN	40,-
Příprava trasy se zasekanými trubkami pro síť LAN	70,-

Tabulka B.4: Ceny montáže dílčích prvků pro nadzemní prvky trasy a vnitřních vedení

Položka vnitřních rozvodů	Cena za položku
Člen odbočovací RISER kabelů VR	35,-
Box optic.URML pro rezervy RISER kabelů	1271,-
Článek útlumový OAF SC/APC 10dB	424,-
Modul ukončovací se zásuvkou SC/APC 10m	410,-
Skříň provařovací OFALink TB72/24	1366,-
Skříň provařovací pro 48 EZ Band	1611,-
Zakončení optické účastnické 3M 8686	134,-
Zakončení optické účastnické ORM1 Micos	48,-
Zásuvka datová UTP CAT5 2xRJ45	197,-
Zásuvka jedno RJ45 s 2xRD na stěnu LeTe	81,-

Tabulka B.5: Cena položek vnitřních rozvodů

Položka	Cena položky
Dokumentace LAN vybudované cizím investorem-stavba	140,-
Realizace optické akce - ostatní činnosti	12800,-
Projednání samostatného odběrného místa	9000,-
Zřízení samostatného odběrného místa	2050,-
Revize přívodu nn do rozvaděče FTTX	3000,-
Zpracování dok. skut. provedení do 50 m	750,-
Zpracování dok. skut. provedení nad 50 m	1800,-
Předměření trasy nad 100 m do 1km za 1 m/pevná částka	13,-/4000,-
Zaměření trasy nad 100 m do 1km za 1 m/pevná částka	18,-/4000,-
Doměření trasy nad 100 m do 1km za 1 m/pevná částka	11,-/4000,-
Plán geom. pro VBŘ do 200 m vč.(kus=100 m)	2200,-
Zajištění dokum. skut. prov. stavba v kabelovodech	17,-
Uzavření sml. o SB o VBŘ	1000,-
Uzavření sml. s odkl. podm. a přípr. vkl. VBŘ	1500,-
Uzavření smlouvy o umístění zařízení	650,-
Uzavření sml. na zákl. SSB a přípr. vkl. VBŘ	1800,-
Zajištění vkladu/výmazu věcného břemene do/z KN	900,-
Akvizice jednoho vchodu	10000,-

Tabulka B.6: Ceny položky projednávání a dokumentace projektů

Typ měření	Cena měření
Měření přímou metodou (1310, 1550 a 1625 nm)	60,-
Měření jednostranné OTDR (1625 nm)	40,-
Měření oboustranné OTDR (1310, 1550 a 1625 nm)	290,-
Měření rozdílové OTDR (1625 nm)	200,-
Měření kabelů sítě LAN v rámci stavby	160,-
Měření stejnosměrné během stavby- první čtyřka	130,-
Měření střídavé během stavby - první čtyřka	70,-
Měření útlumu během stavby- první čtyřka	130,-

Tabulka B.7: Ceny za měření, cena je uvedena za měření jednoho vlákna/met. čtyřky

Prvek materiálu	Cena za materiál
Plastová infrastruktura	
Trubka HDPE 40/33 mm	20,-
Záslepka trubky HDPE 40 mm	5,-
Trubka ochranná IDI 32/27 mm nehořlavá	28,-
Fólie výstražná 220 mm PE oranžová	3,-
Fólie výstražná 330 mm PE oranžová	5,-
Koncovka trubky 40 mm Plasson	105,-
Průchodka těsnící HDPE 40 mm - 2 x kabel	557,-
Spojka T 40/40/40 pro trubičkový systém	470,-
Spojka trubky HDPE 40 mm Plasson	169,-
Spojka Y 40/40/40 pro trubičkový systém	471,-
Trubička HDPE 10/8 mm	4,-
Trubička HDPE 7/5,5 mm	2,-
Trubičkový systém 3x10+4x7	20,-
Trubička HDPE 12/8 mm	12,-
Trubička HDPE 10/5,5 mm speciál	11,-
Svazek silnostěnných trubiček 12x10/5,5 mm	80,-
Trubička HDPE 7/3,5 mm speciál	4,-
Trubička HDPE 10/8 mm nehoř.	8,-
Trubička HDPE 8/5,5 mm nehoř.	11,-
Optická infrastruktura	
Kabel opt. MiDia 24 vl. AW+ 7,5mm s Cu	18,-
Kabel opt. EZ-Bend CORDAGE 3mm 1 vlákno	8,-
Mikrokabel FU-OFS AccuBreeze 2f AW FLEX	6,-
Mikrokabel opt. 24 vl. AW 4xribb. OFS Xpress	21,-
Mikrokabel optický samonosný OFS 12 vl.	16,-
Metalická infrastruktura	
Kabel plastový TCEPKPFLE 3x4x0,4	10,-
Kabel vnitřní LAM DATAPAR 4x2x0,5mm	14,-
Kabel vnitřní SEKU 2x0,8 mm Cu	5,-
Kabel vnitřní UCEKFY 5x4x0,4 mm	15,-

Tabulka B.8: Cena za materiál sdělovacích kabelů a plastové infrastruktury

Prvek materiálu	Cena za materiál
Komora kabelová OFA 900x450x500mm	2624,-
Víko litinové komory OFA 900x450mm 12,5t	5268,-
Víko litinové komory OFA 900x450mm 40t	8333,-
Kryt optické rezervy PKOR 1000x780x300	6127,-
Skříň nástěnná MNS 19' 12U 550x570	4000,-
Skříň stojanová MSS 19' 15U 600x600	7700,-
Rozváděč opto ORMP 1U 24 vl.	2100,-
Rozváděč opto ODF LSC1U-144/21	17000,-
Rozváděč opto MNS 12U, var. 1 FTTB	10070,-
Rozváděč opto ORM 24 vl. pod omítku	5550,-
Spojka nadzemní opt. MICOS ORU 1 (24 svar)	10685,-
Spojka nadzemní opt. MICOS ORU 2 (48 svar)	16430,-
Spojka opt.COYOTE DROP TERM.CLOS. (DTC)	966,-
Spojka opt.univerzál.Coyote RUNT In-Line	4023,-
Skříň SIS 900-A s nást. rDSLAM HD 180	26871,-
Skříň mDSLAM 450 HD180 s ventilátorem	23808,-
Skříň SDF 384(432)	30300,-
Skříň ODF 144 rDSLAM - sloupek	19843,-
Skříň PON 32 - sloupek	5851,-
Box zazdívací ORM 4 G2	785,-
Sloupek SIS ORM 4 G2	1950,-
Komora MUC 250 s boxem IP67 G2	1750,-
PIGTAIL SANWA SM4f 4xSC/APC(2mm 0,3m)5m	587,-

Tabulka B.9: Cena za materiál rozvaděčů, komor a provažovacích boxů

Typ splitteru	Cena za splitter
Rozbočovač opt. 1x2 SC/APC-LC/APC 1m	361,-
Rozbočovač opt. 1x4 SC/APC-LC/APC 1m	435,-
Rozbočovač opt. 1x8 SC/APC-LC/APC 1m	587,-
Rozbočovač opt. 1x32 LGX,SC/APC-LC/APC	7882,-
Rozbočovač opt. 1x64 LGX,SC/APC-LC/APC	10562,-
Splitter pro provař. skříň sm PLC 1x16	901,-
Splitter pro provař. skříň sm PLC 1x32	1673,-
Splitter pro provař. skříň sm PLC 1x64	3653,-

Tabulka B.10: Cena splitterů

B.3 Výstavba lokalit

Typ technologie	vnější trasy	vnitřní trasy	mini SDF
GPON ONU [Kč]	5 193 668	4 852 408	4 693 736
na BJ [Kč/BJ]	6 205	5 797	5 608
GPON ONT [Kč]	5 863 268	5 522 008	5 363 336
na BJ [Kč/BJ]	7 005	6 597	6 408
G.fast [Kč]	13 389 265	13 105 290	–
na BJ [Kč/BJ]	15 997	15 657	–

Typ technologie	Cena
WiGig over GPON ONT [Kč]	8 117 000
na BJ [Kč/BJ]	9 698
Wigig over G.fast [Kč]	12 370 250
na BJ [Kč/BJ]	14 779

Tabulka B.11: Investice na vybudování lokality vysokých BD

Typ technologie	vnější trasy	vnitřní trasy	mini SDF
GPON ONU [Kč]	2 526 878	2 056 118	1 926 018
na BJ [Kč/BJ]	8 367	6 808	6 378
GPON ONT [Kč]	2 768 478	2 297 718	2 167 618
na BJ [Kč/BJ]	7 167	7 608	7 178
G.fast [Kč]	6 420 103	5 993 803	–
na BJ [Kč/BJ]	21 259	19 847	–

Typ technologie	Cena
WiGig over GPON ONT [Kč]	5 138 100
na BJ [Kč/BJ]	17 014
Wigig over G.fast [Kč]	5 431 323
na BJ [Kč/BJ]	17 985

Tabulka B.12: Investice na vybudování lokality nízkých BD

Typ technologie	jednostup. splitt	dvoustup. splitt
GPON ONU [Kč]	4 317 590	3 194 033
na BJ [Kč/BJ]	17 841	13 198
GPON ONT [Kč]	4 511 190	3 387 633
na BJ [Kč/BJ]	18 640	13 998
G.fast [Kč]	6 139 710	–
na BJ [Kč/BJ]	25 371	–
WiGig [Kč]	1 865 500	–
na BJ [Kč/BJ]	7 709	–

Tabulka B.13: Investice na vybudování lokality řadových RD

Typ technologie	RD	Samoty
GPON ONU [Kč]	2 523 900	2 888 520
na BJ [Kč/BJ]	31 549	106 982
GPON ONT [Kč]	2 587 900	2 910 120
na BJ [Kč/BJ]	32 349	107 782
G.fast [Kč]	3 226 610	3 155 816
na BJ [Kč/BJ]	40 333	116 882
WiGig [Kč]	770 600	383 000
na BJ [Kč/BJ]	9 633	14 185

Tabulka B.14: Investice na vybudování lokality RD a samot

B.3.1 Připravená metalická infrastruktura

Typ technologie	VBD-vnější	VBD-vnitřní	NBD-vnější	NBD-vnitřní
G.fast [Kč]	10 040 965	9 776 590	5 151 303	4 758 003
na BJ [Kč/BJ]	11 996	11 681	17 057	15 755
Typ technologie	Vysoké BD		Nízké BD	
Wigig over G.fast [Kč]	9 866 475		5 002 623	
na BJ [Kč/BJ]	11 788		16 565	
Typ technologie	Řadové RD	RD	Samoty	
G.fast [Kč]	1 952 616	777 810	282 386	
na BJ [Kč/BJ]	8 069	9 723	10 459	

Tabulka B.15: Investice na vybudování lokalit s přípravou metalické infrastruktury

B.4 Investice za prvních 10 let

Typ technologie	vnější trasy	vnitřní trasy	mini SDF
GPON ONU [Kč]	6 326 768	5 985 508	5 826 836
na BJ [Kč/BJ]	7 559	7 151	6 962
GPON ONT [Kč]	7 665 968	7 324 708	7 166 036
na BJ [Kč/BJ]	9 159	8 751	8 562
G.fast [Kč]	21 179 515	20 895 540	–
na BJ [Kč/BJ]	25 304	24 965	–
Typ technologie		Cena	
WiGig over GPON ONT [Kč]		23 071 900	
na BJ [Kč/BJ]		27 565	
Wigig over G.fast [Kč]		31 076 200	
na BJ [Kč/BJ]		37 128	

Tabulka B.16: Investice za 10 let za výstavbu lokality vysokých BD

Typ technologie	vnější trasy	vnitřní trasy	mini SDF
GPON ONU [Kč]	2 947 978	2 477 218	2 347 118
na BJ [Kč/BJ]	9 762	8 203	7 772
GPON ONT [Kč]	3 431 178	2 960 418	2 830 318
na BJ [Kč/BJ]	11 362	9 803	9 372
G.fast [Kč]	9 389 326	8 963 026	–
na BJ [Kč/BJ]	31 090	29 679	–
Typ technologie		Cena	
WiGig over GPON ONT [Kč]		14 079 600	
na BJ [Kč/BJ]		46 621	
Wigig over G.fast [Kč]		14 484 846	
na BJ [Kč/BJ]		47 963	

Tabulka B.17: Investice za 10 let za výstavbu lokality nízkých BD

Typ technologie	jednostup. splitt	dvoustup. splitt
GPON ONU [Kč]	4 660 690	3 537 133
na BJ [Kč/BJ]	19 259	14 616
GPON ONT [Kč]	5 047 890	3 924 333
na BJ [Kč/BJ]	20 859	16 216
G.fast [Kč]	8 092 326	–
na BJ [Kč/BJ]	33 439	–
WiGig [Kč]	5 171 000	–
na BJ [Kč/BJ]	21 368	–

Tabulka B.18: Investice za 10 let za vybudování lokality řadových RD

Typ technologie	RD	Samoty
GPON ONU [Kč]	2 656 400	2 952 120
na BJ [Kč/BJ]	33 205	109 338
GPON ONT [Kč]	2 784 400	2 995 320
na BJ [Kč/BJ]	34 805	110 938
G.fast [Kč]	4 004 420	3 438 202
na BJ [Kč/BJ]	50 055	127 341
WiGig [Kč]	2 261 200	1 246 000
na BJ [Kč/BJ]	28 265	46 148

Tabulka B.19: Investice za 10 let za vybudování lokality RD a samot

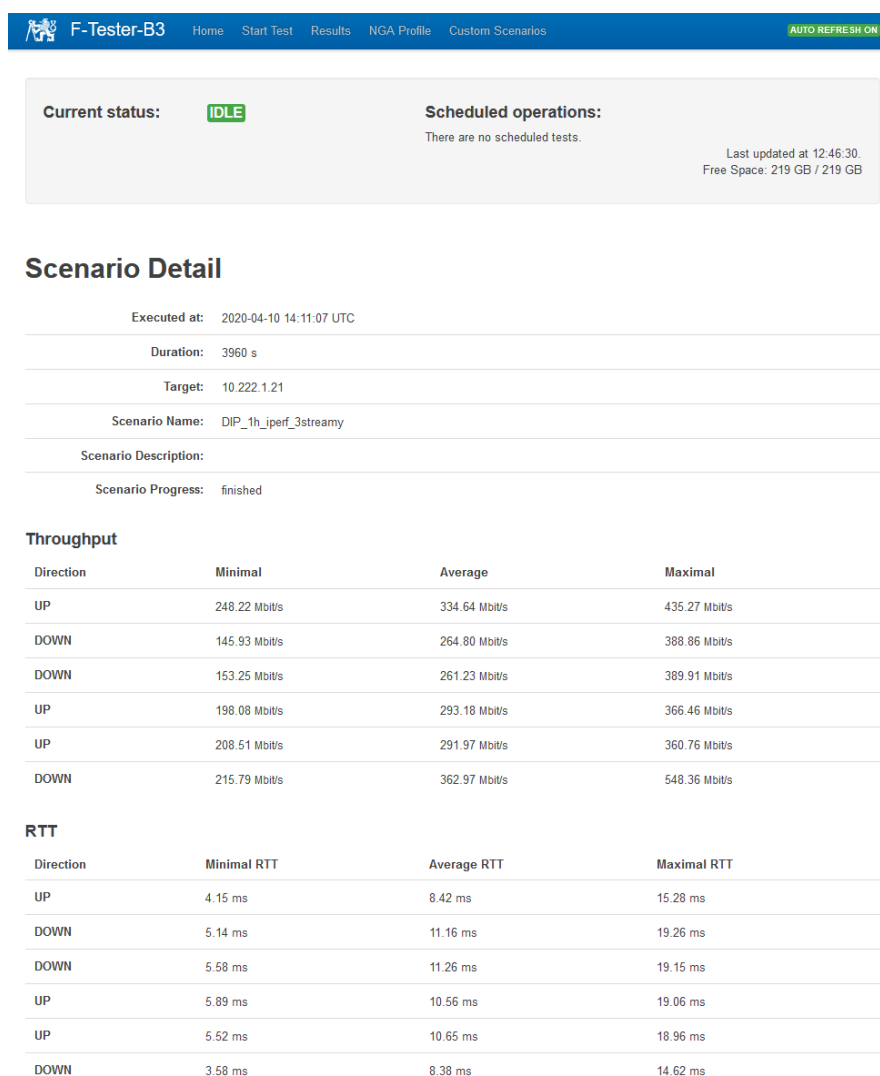
B.4.1 Připravená metalická infrastruktura

Typ technologie	VBD-vnější	VBD-vnitřní	NBD-vnější	NBD-vnitřní
G.fast [Kč]	17 831 215	17 566 840	8 120 526	7 727 226
na BJ [Kč/BJ]	21 304	20 988	26 889	25 587
Typ technologie	Vysoké BD		Nízké BD	
Wigig over G.fast [Kč]	28 572 425		14 056 146	
na BJ [Kč/BJ]	34 137		46 544	
Typ technologie	Řadové RD	RD	Samoty	
G.fast [Kč]	3 905 232	1 555 620	564 772	
na BJ [Kč/BJ]	16 137	19 445	20 917	

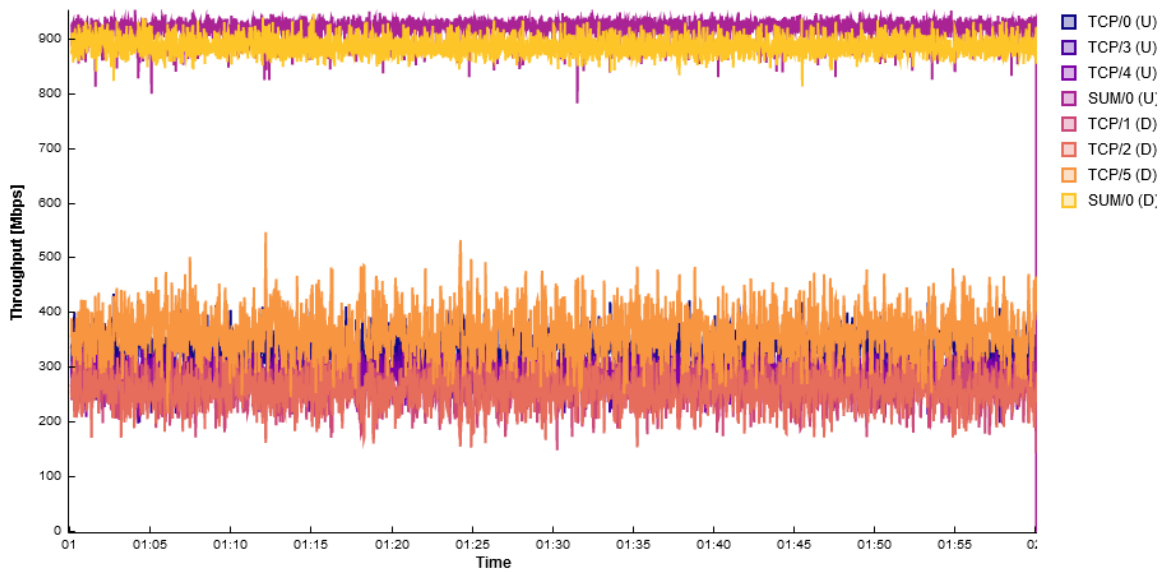
Tabulka B.20: Investice za 10 let za vybudování lokalit s přípravou metalické infrastruktury

Příloha C

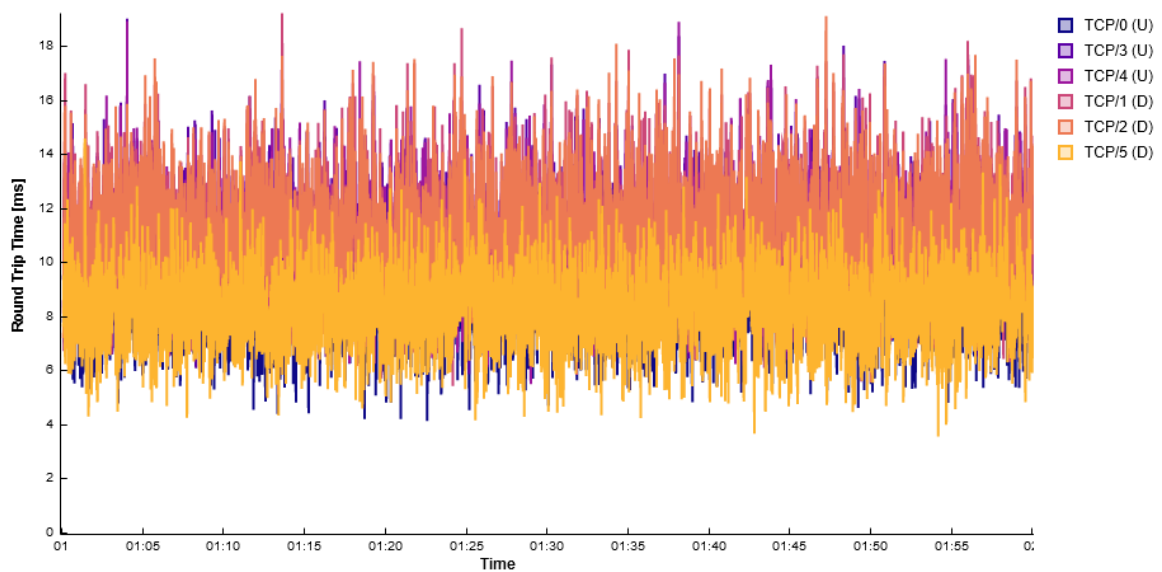
Měření F-Tester



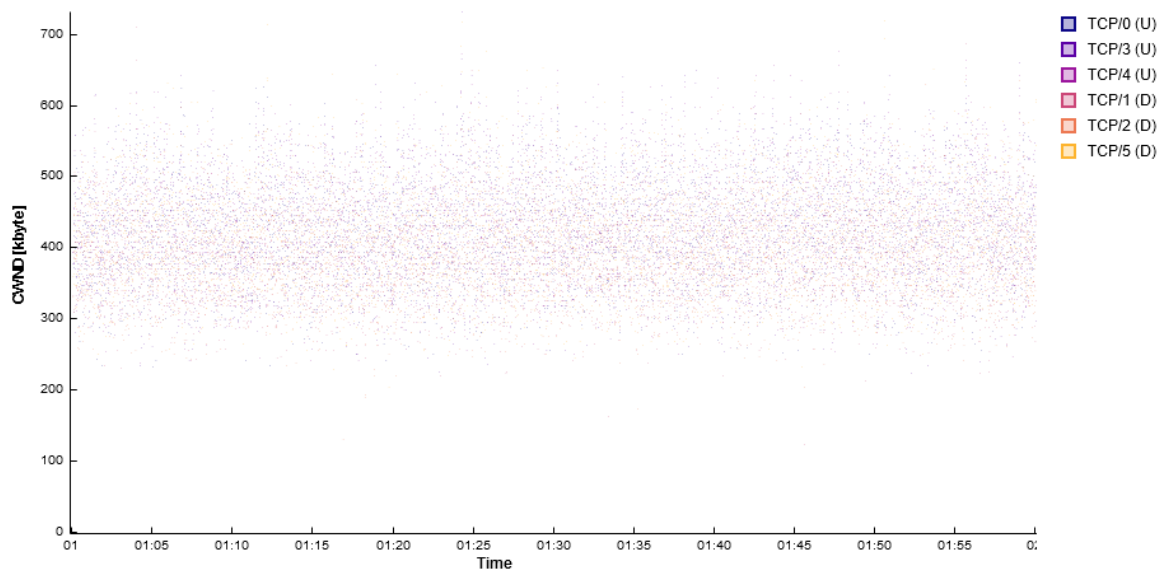
Obrázek C.1: Souhrnné informace o proběhlém měření a data o propustnosti a zpoždění



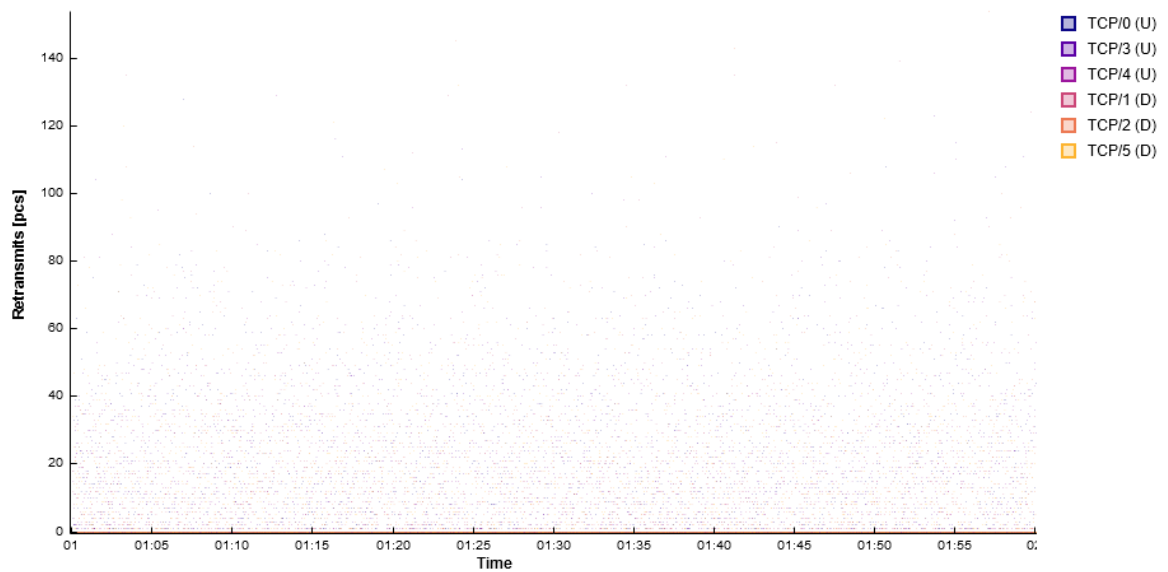
Obrázek C.2: Zobrazení průběhů propustnosti, spodní část grafu jsou dílčí měření a v horní části grafu je součet měření pro jednotlivé směry



Obrázek C.3: Časový průběh RTT všech měření. Nejnižší hodnota byla 3,58 ms a nejvyšší hodnota dosahovala 19,26 ms

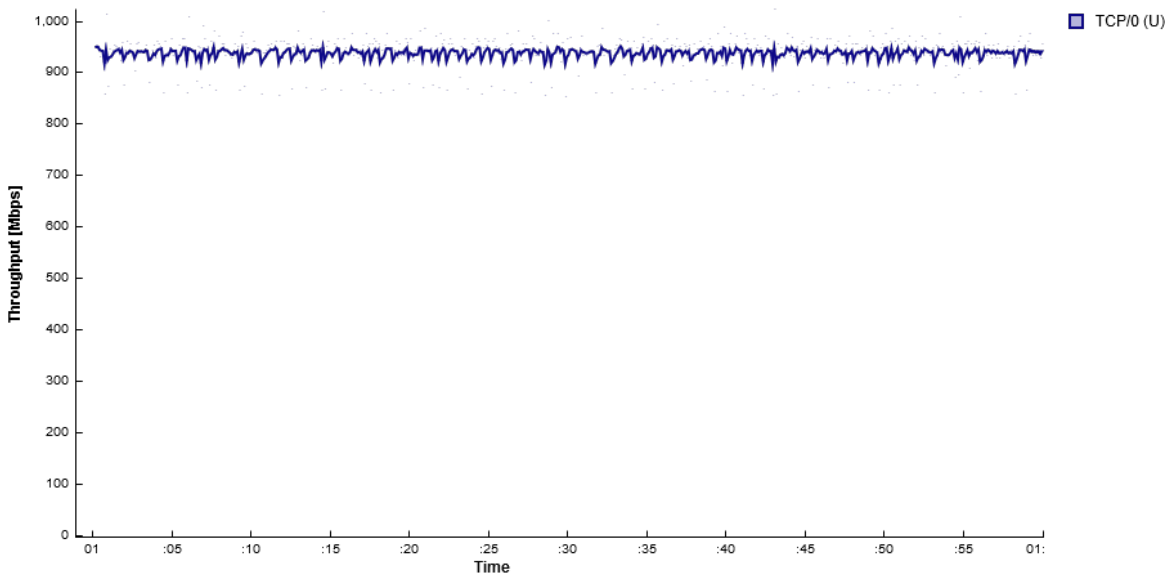


Obrázek C.4: Rozptyl použitých maximálních oken přetížení v průběhu měření. Nejnižší hodnoty byly okolo 250 kByte a nejvyšší okolo 650 KByte

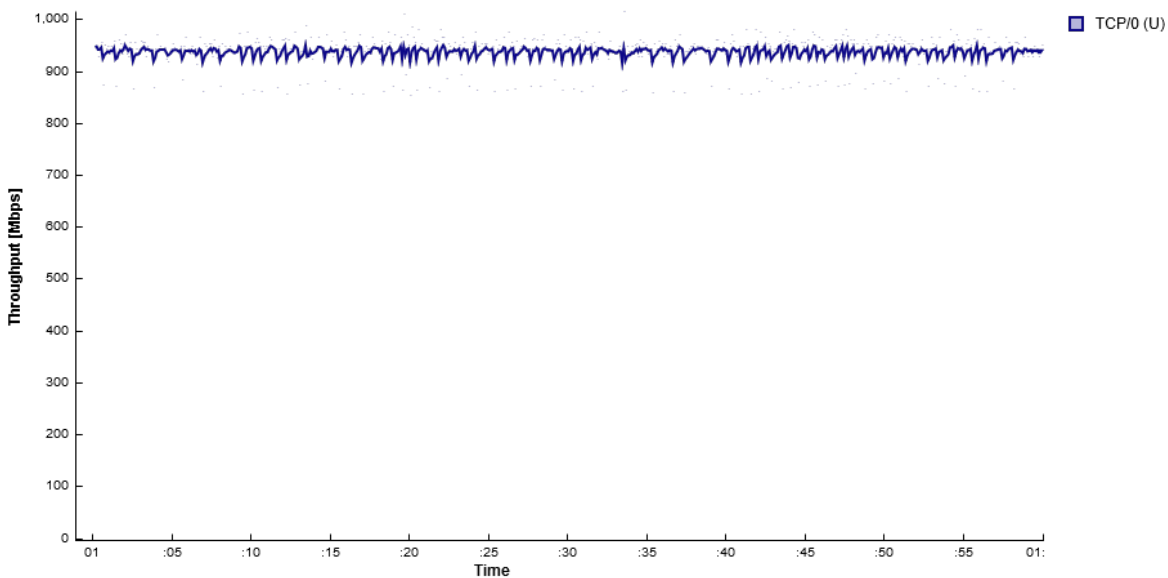


Obrázek C.5: Počet přeposlancých paketů se držel v hodnotách nižších než 3 přeposlancých pakety za sekundu a maximální počet byl 129 přeposlancí

C.1 IPerf měření - porovnání algoritmů



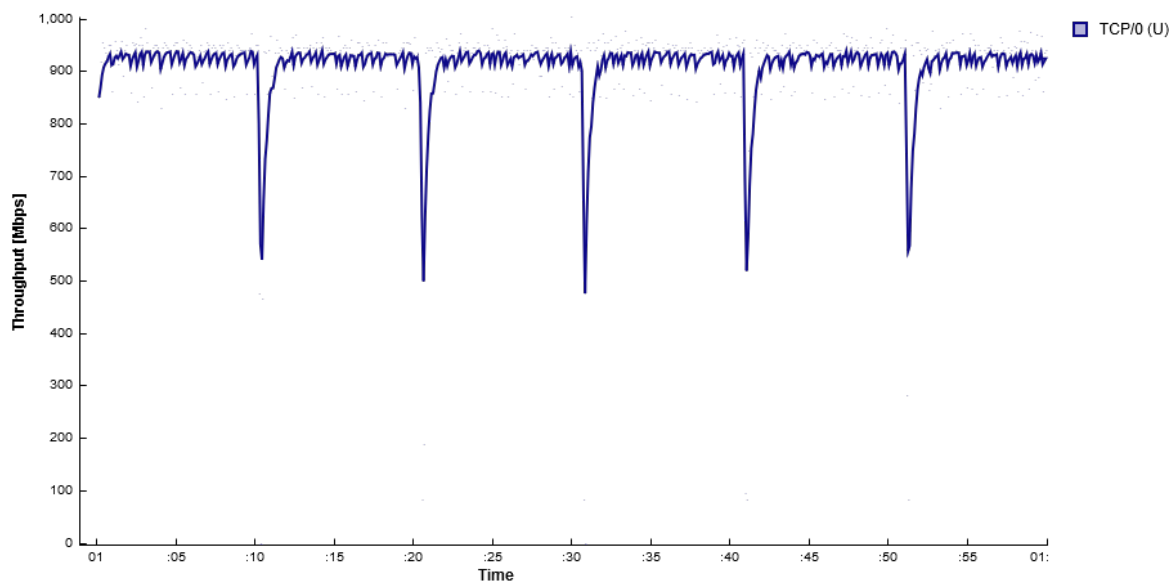
Obrázek C.6: Průběh přenosové rychlosti v měření pomocí algoritmu IPerf Reno



Obrázek C.7: Průběh přenosové rychlosti v měření pomocí algoritmu IPerf Cubic

Když si detailně prohlédneme průběhy IPerf Reno a Cubic, mohou se zdát stejné. Jsou si velice podobné, ale liší se v drobném úseku při dovršení maximální přenosové rychlosti. Algoritmus Reno udržuje konstantní nárůst rychlosti a vypadá tak lineárně, Cubic narozdíl od Reno svůj nárůst zpomaluje a „zaobljuje“ tím průběh nárůstu přenosové rychlosti.

Průběh algoritmu BRR je oproti zbylým dvou algoritmům velice odlišný. V tento případ nebyl schopný navýšit svoji přenosovou rychlost přes interface 1 GE rozhraní a není tedy viditelný špičkový nárůst rychlosti, pouze jeho pokles.



Obrázek C.8: Průběh přenosové rychlosti v měření pomocí algoritmu IPerf BRR

C.2 Natočení antén 60 GHz spoje



Obrázek C.9: Fotografie umístění antén na střeše ČVUT FEL, foceno z bloku B3. AP jsou nasměrované přímo proti sobě

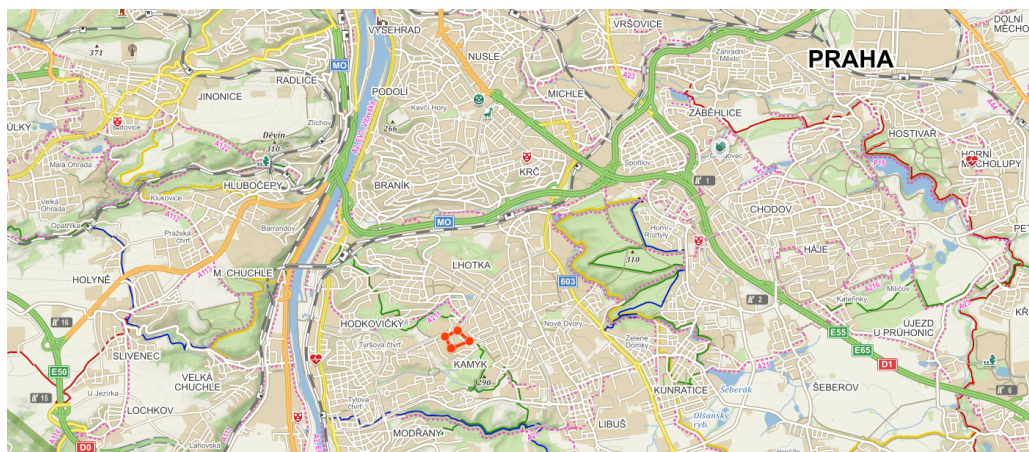


Obrázek C.10: Fotografie umístění antén na střeše ČVUT FEL, foceno z bloku B3. AP jsou vyosené vůči sobě, anténa na bloku B3 je natočená přibližně o 80°

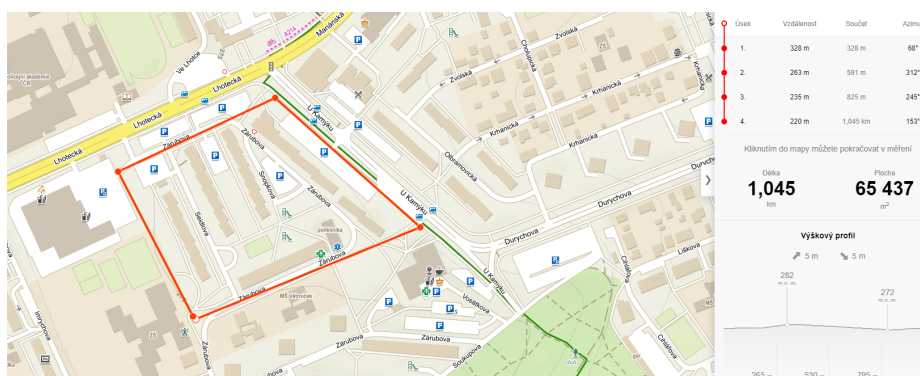
Příloha D

Atrakční lokality

D.1 Lokalita s vysokými bytovými domy



Obrázek D.1: Lokalita vysokých BD zobrazená na zvětšené mapě

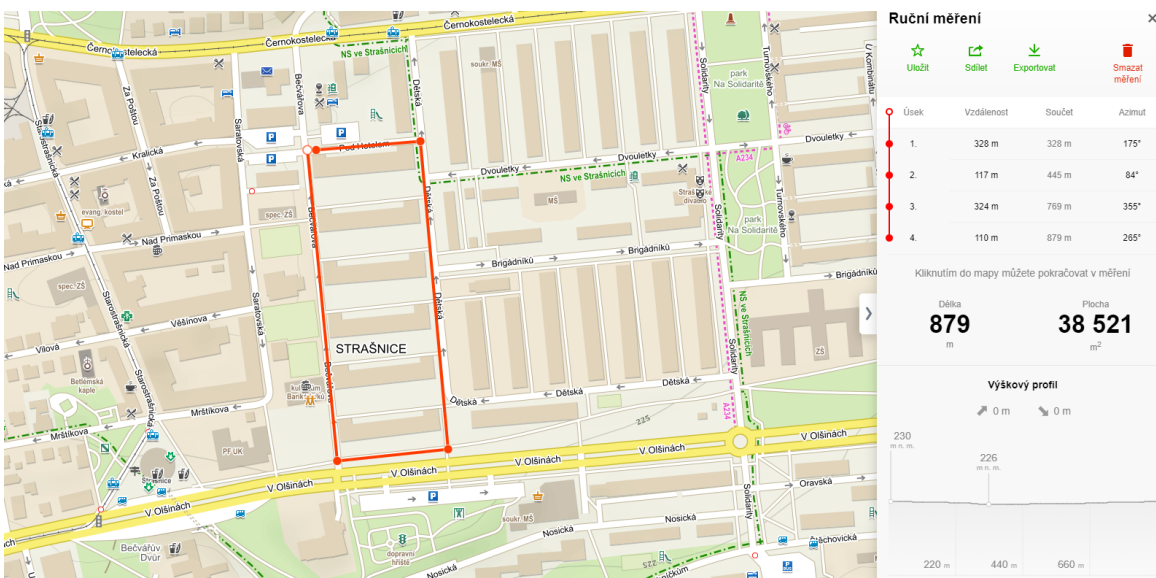


Obrázek D.2: Detailní zobrazení lokality s vysokými BD včetně vypočítané rozlohy vzorové lokality

D.2 Lokalita s nízkými bytovými domy

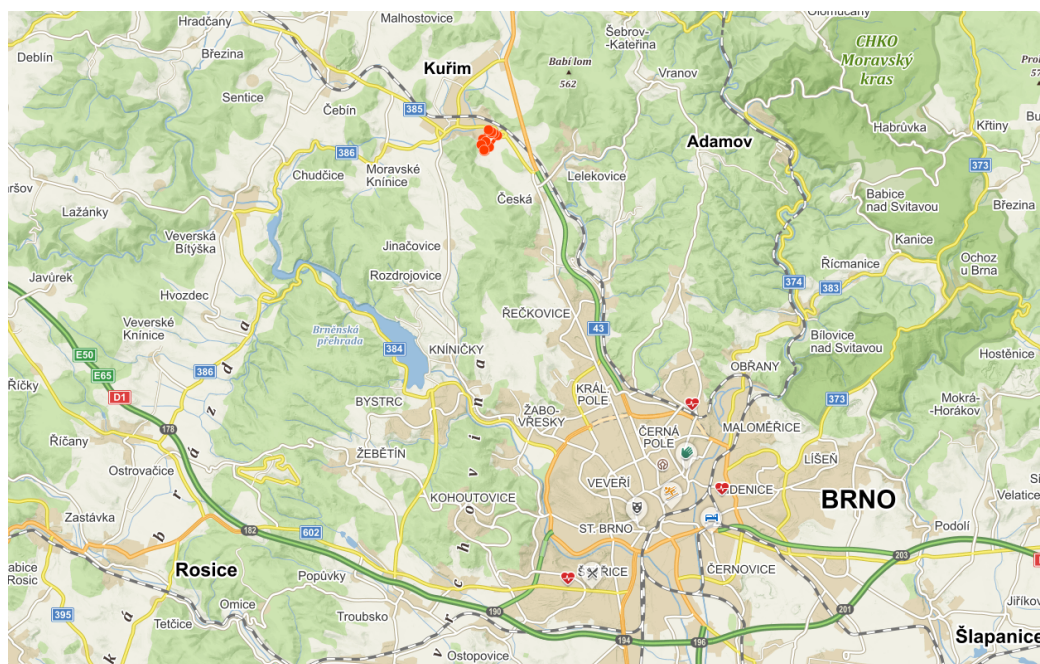


Obrázek D.3: Lokalita nízkých BD zobrazená na zvětšené mapě



Obrázek D.4: Detailní zobrazení lokality s nízkými BD včetně vypočítané rozlohy vzorové lokality

D.3 Lokalita s řadovými rodinnými domy s více BJ

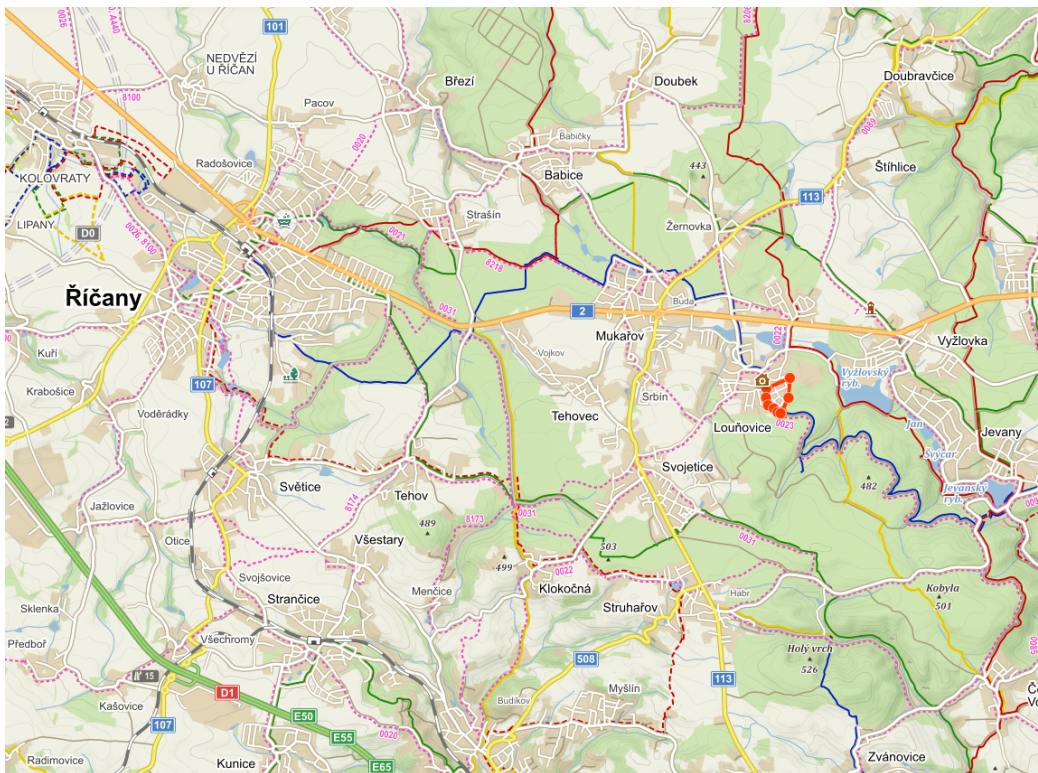


Obrázek D.5: Lokalita řadových RD zobrazená na zvětšené mapě

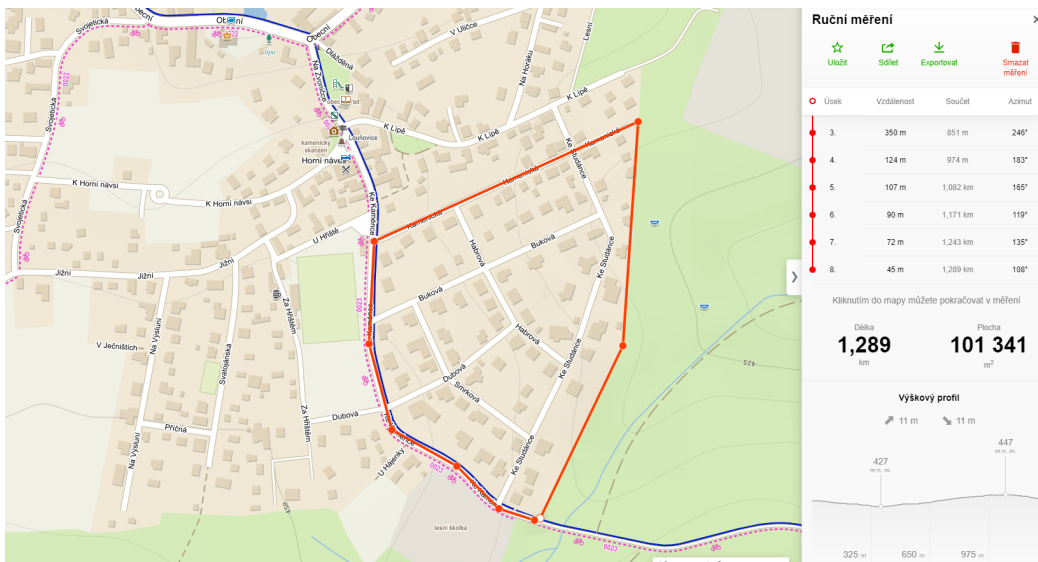


Obrázek D.6: Detailní zobrazení lokality řadových RD včetně vypočítané rozlohy vzorové lokality

D.4 Lokalita s rodinnými domy - hustá zástavba

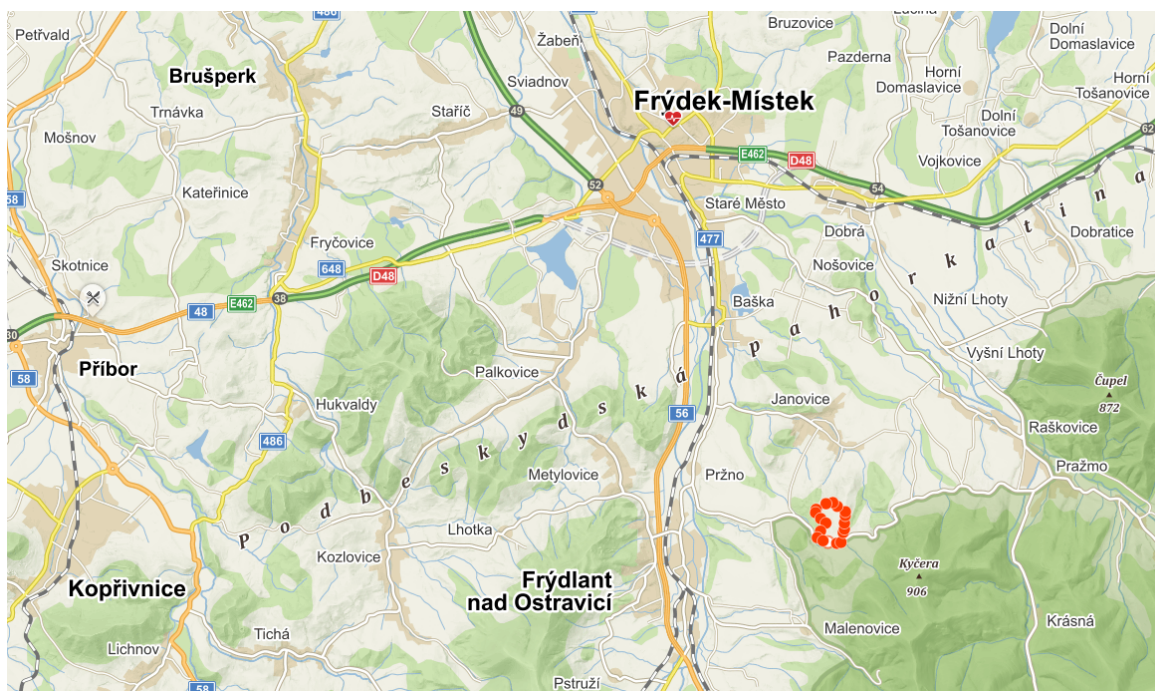


Obrázek D.7: Lokalita RD zobrazená na zvětšené mapě

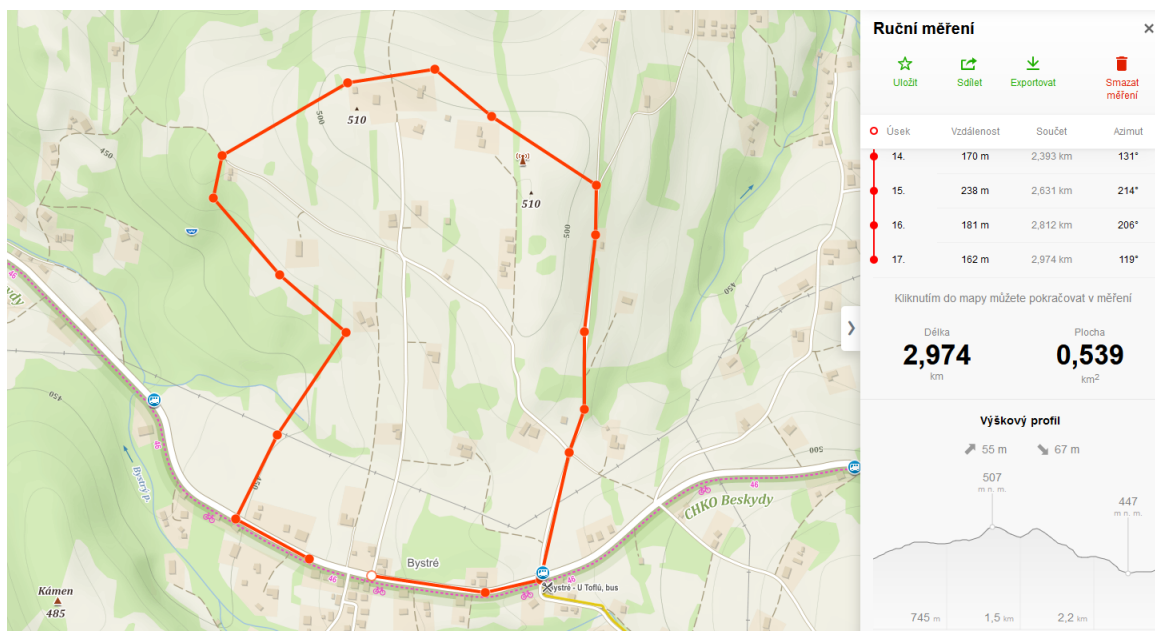


Obrázek D.8: Detailní zobrazení lokality s RD včetně vypočítané rozlohy vzorové lokality

D.5 Lokalita s rodinnými domy - řídká zástavba



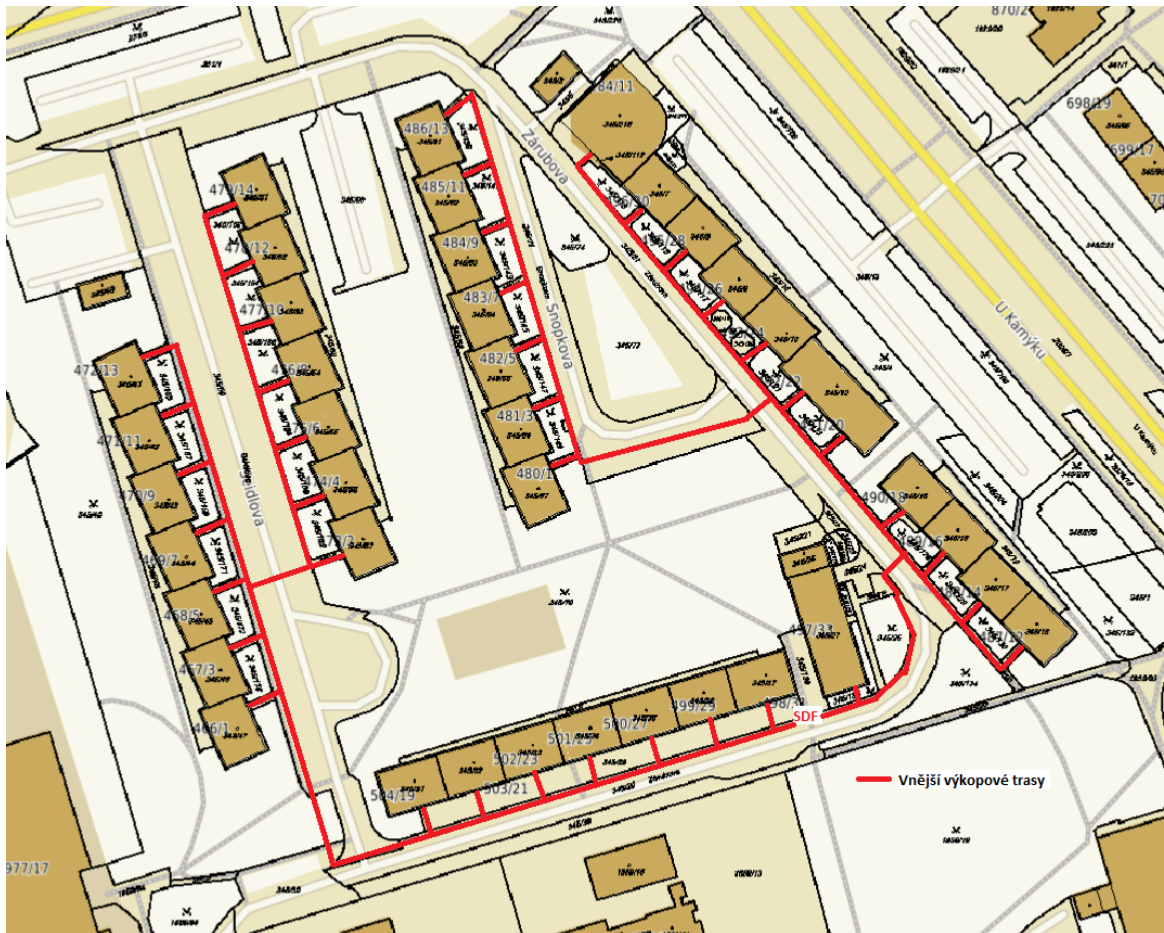
Obrázek D.9: Lokalita samot zobrazená na zvětšené mapě



Obrázek D.10: Detailní zobrazení lokality samot včetně vypočítané rozlohy vzorové lokality

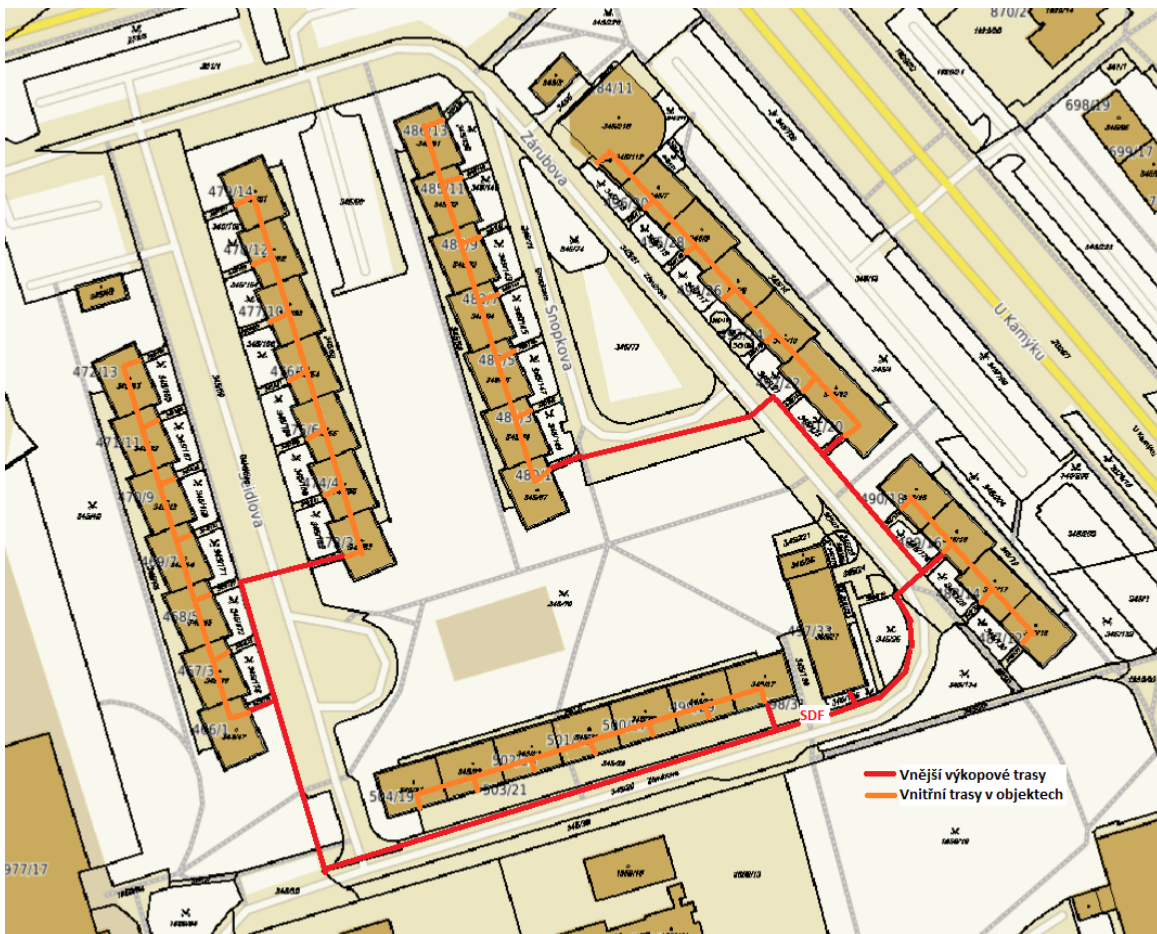
Příloha E

Výkopová schémata



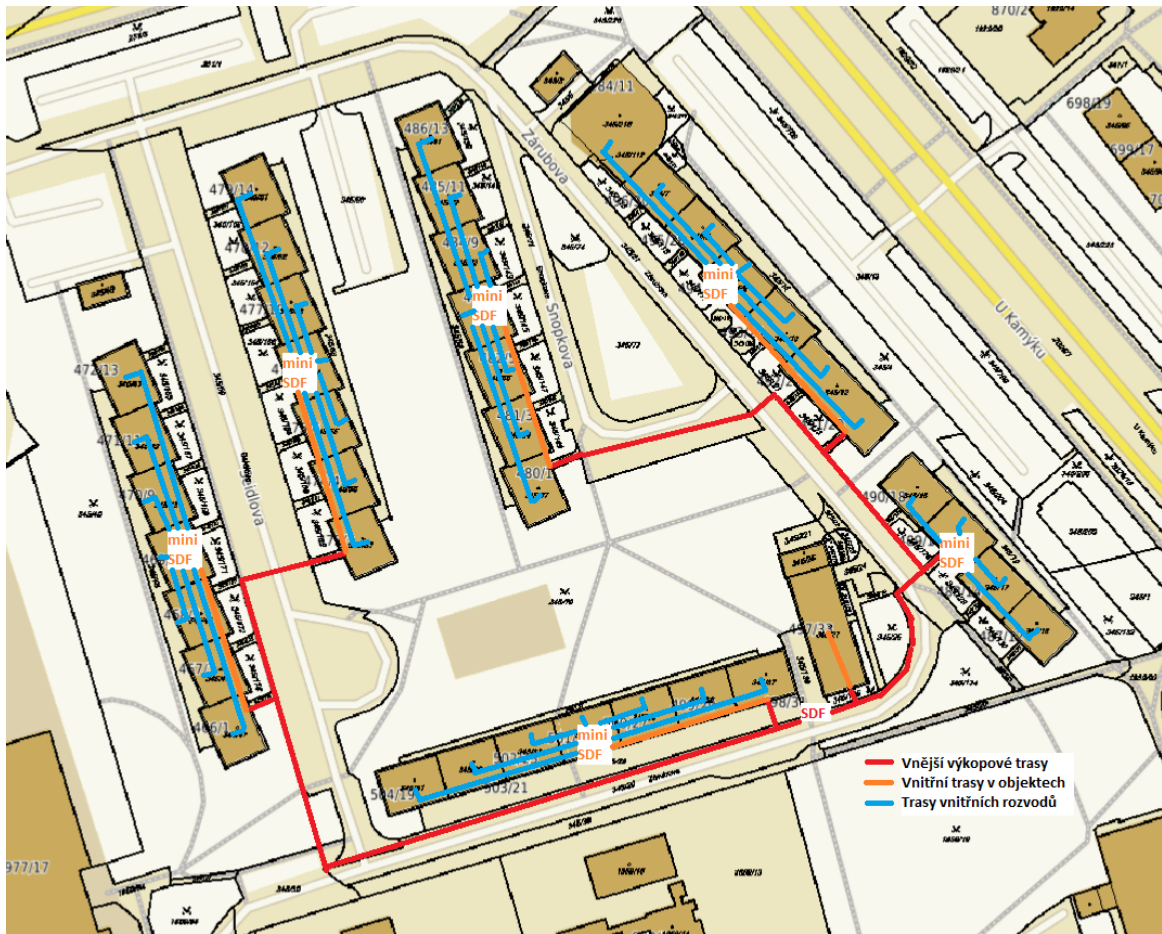
Obrázek E.1: Schéma výkopových prací pro čisté vnější trasy výkopů - vysoké BD

Pro situaci s výkopy pro napojení objektů vnější trasou vychází pro lokalitu s vysokými BD celková délka výkopů na 950 m. Průměrná délka výkopů na jednu BJ vychází 1,14 m/BJ.



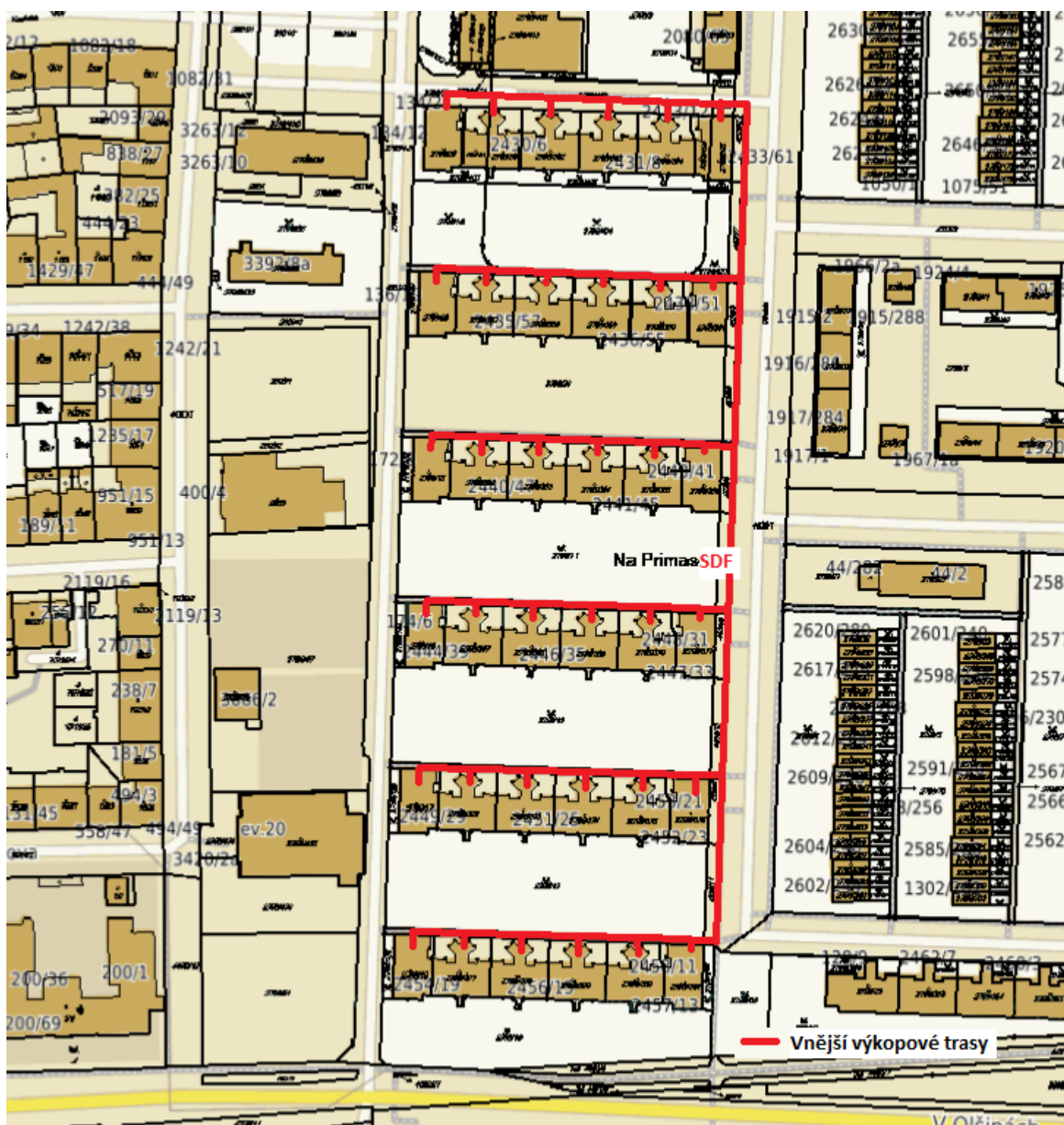
Obrázek E.2: Schéma výkopových prací s využitím vnitřních tras v objektech - vysoké BD

Pro situaci s možností využití vnitřní trasy v objektech vychází pro lokalitu s vysokými BD celková délka výkopů na 530 m. Průměrná délka výkopů na jednu BJ vychází 0,63 m/BJ.



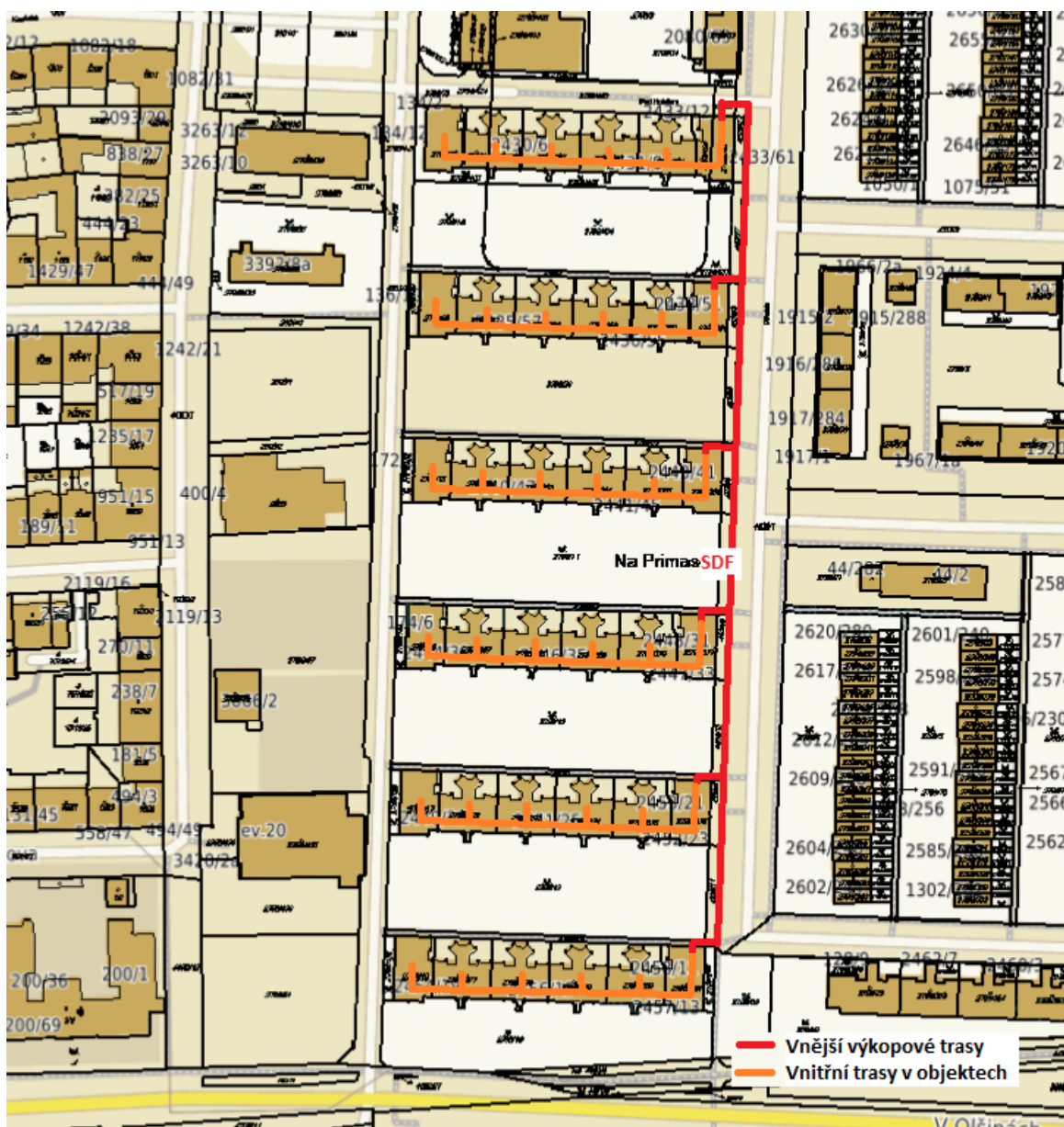
Obrázek E.3: Schéma výkopových prací s využitím vnitřních tras v objektech s vlastním mini SDF - vysoké BD

Délka výkopů pro využití vnitřních mini SDF je shodná s variantou využití vnitřních tras v objektech, tedy 530 m. Průměrná délka výkopů na jednu BJ vychází 0,63 m/BJ.



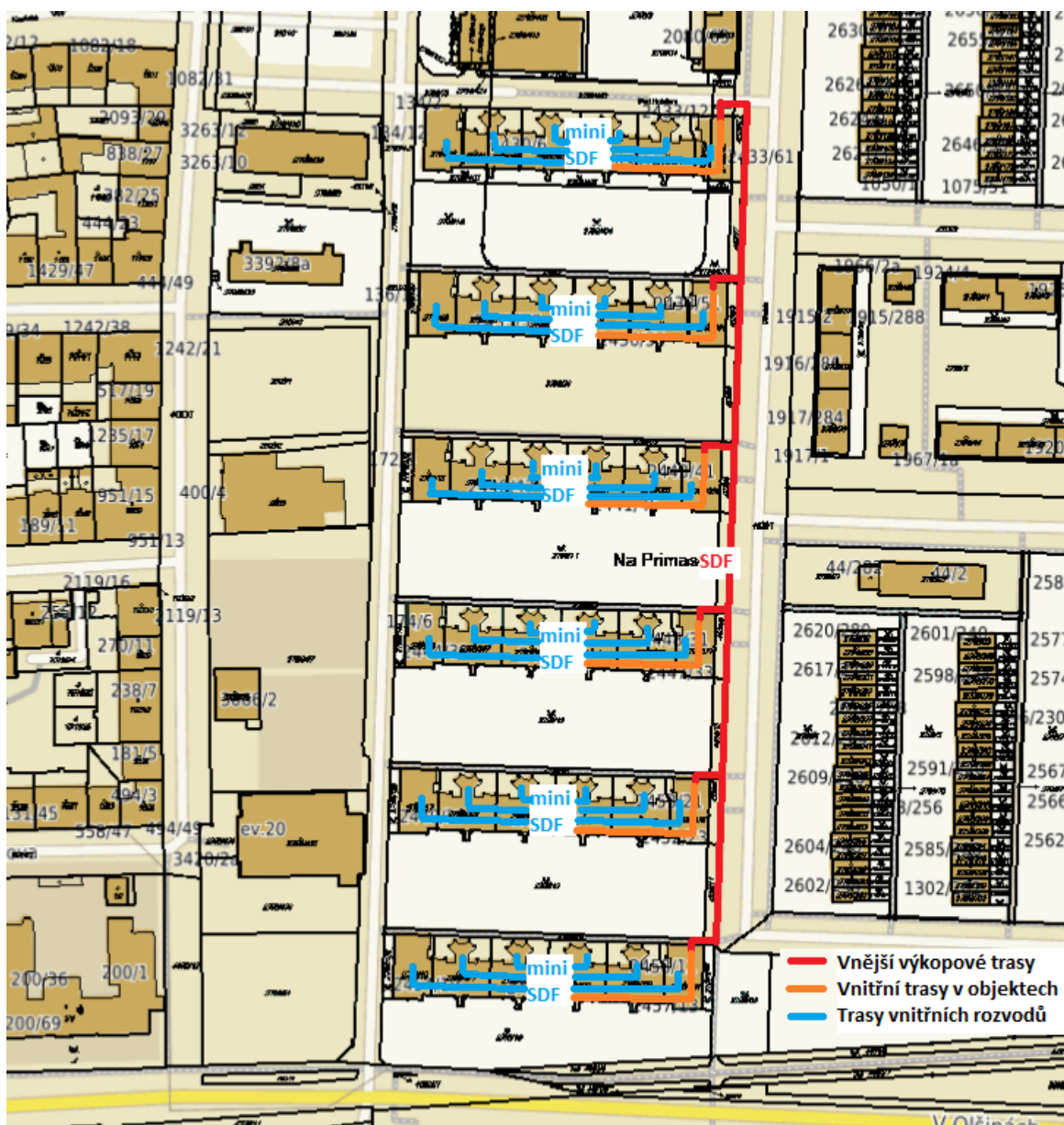
Obrázek E.4: Schéma výkopových prací pro čistě vnější trasy výkopů - nízké BD

Pro situaci s výkopy pro napojení objektů vnější trasou vychází pro lokalitu s nízkými BD celková délka výkopů na 1070 m. Průměrná délka výkopů na jednu BJ vychází 3,54 m/BJ.



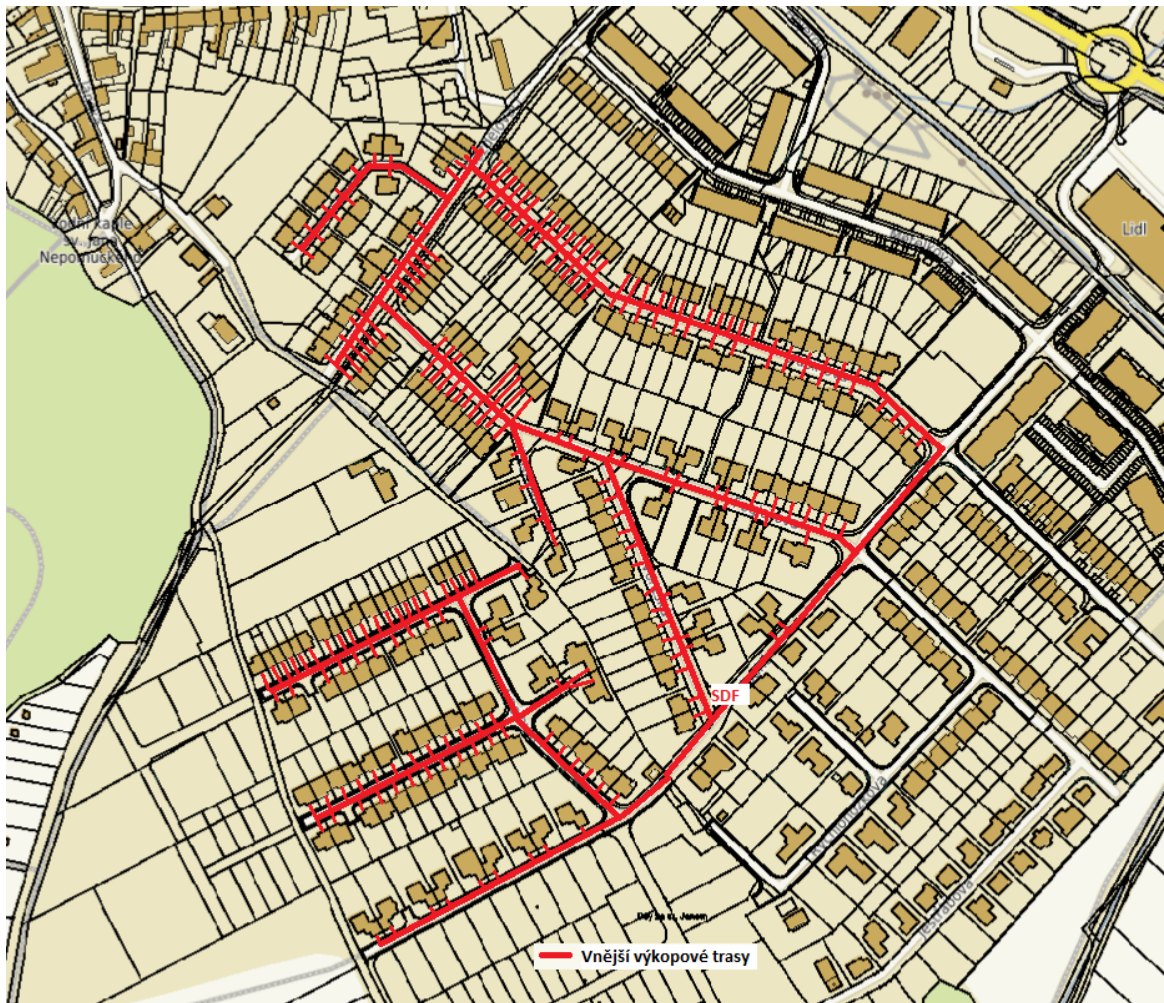
Obrázek E.5: Schéma výkopových prací s využitím vnitřních tras v objektech - nízké BD

Pro situaci s možností využití vnitřní trasy v objektech vychází pro lokalitu s nízkými BD celková délka výkopů na 450 m. Průměrná délka výkopů na jednu BJ vychází 1,49 m/BJ.



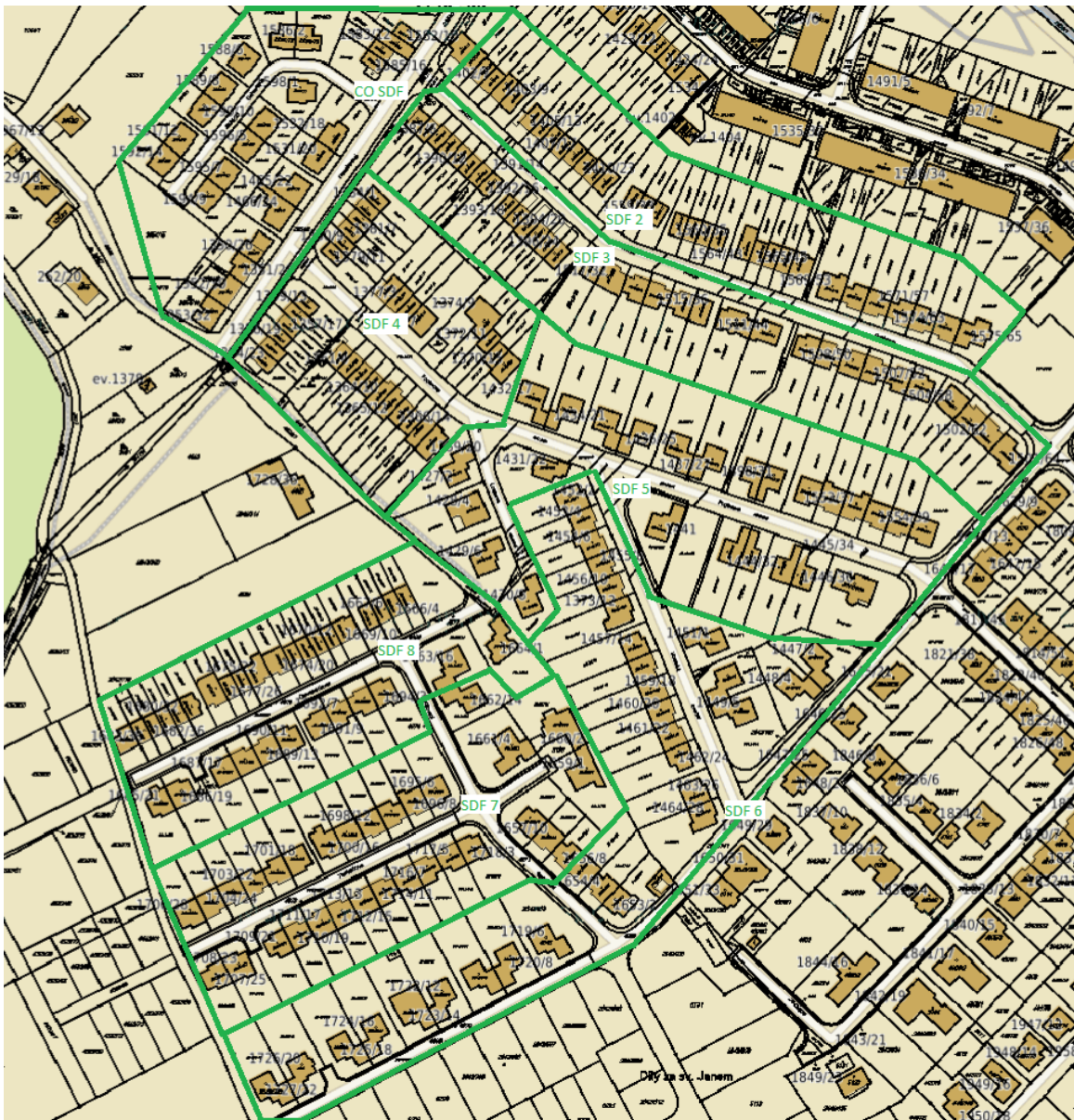
Obrázek E.6: Schéma výkopových prací s využitím vnitřních tras v objektech s vlastním mini SDF - nízké BD

Délka výkopů pro využití vnitřních mini SDF je shodná s variantou využití vnitřních tras v objektech, tedy 450 m. Průměrná délka výkopů na jednu BJ vychází 1,49 m/BJ.



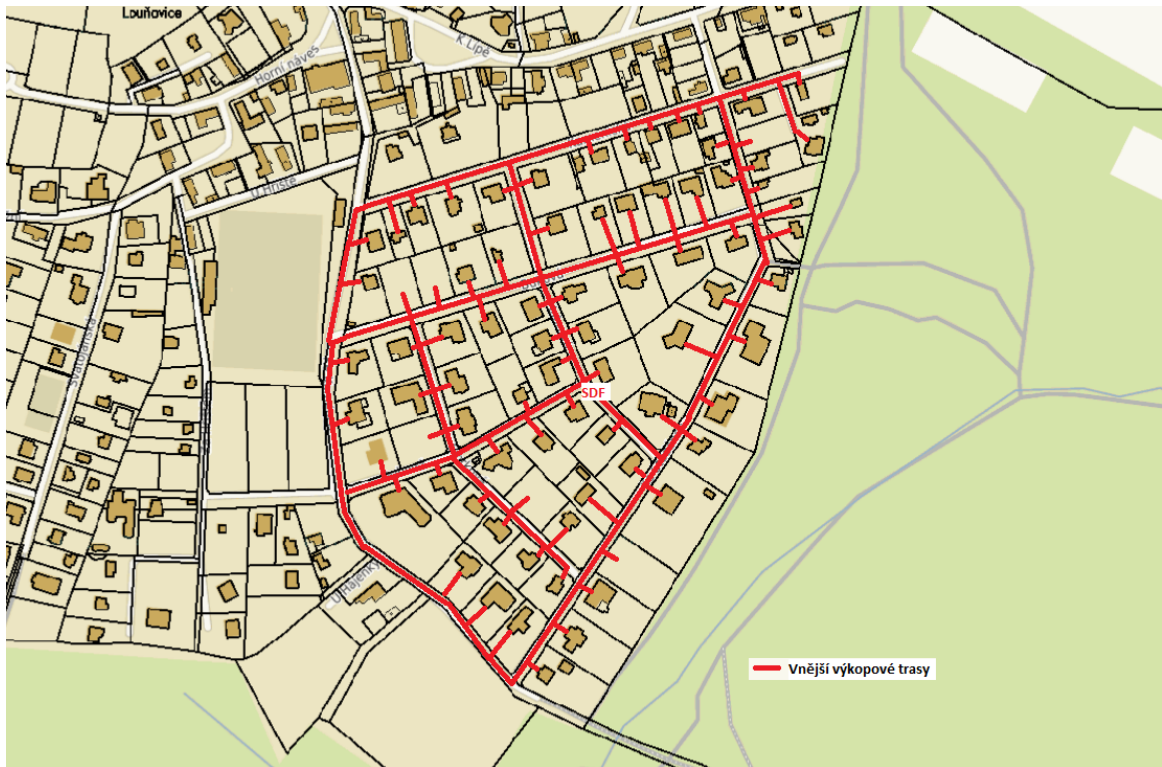
Obrázek E.7: Schéma výkopových prací pro trasy výkopů - řadové RD

Pro napojení všech objektů v lokalitě řadových RD vychází délka výkopů na 3634 m. Průměrná délka výkopů na jednu BJ vychází 15,02 m/BJ.



Obrázek E.8: Schéma rozdělení lokality na 8 podlokality pro využití víceúrovňového splitte-rování - řadové RD

Při využití víceúrovňového splitte-rování je použit sloupek PON32 se zapojení splitteru 1x32 s vyvedením příchozího vlákna v CO SDF.



Obrázek E.9: Schéma výkopových prací pro trasy výkopů - RD

Pro napojení všech objektů v lokalitě RD vychází délka výkopů na 3280 m. Průměrná délka výkopů na jednu BJ vychází 45,56 m/BJ.



Obrázek E.10: Schéma výkopových prací pro trasy výkopů - samoty

Pro napojení všech objektů v lokalitě samot vychází délka výkopů na 3980 m. Průměrná délka výkopů na jednu BJ vychází 147,41 m/BJ.