

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Marek Oplištil

**Možnosti mobilních sítí pro realizaci  
požadavků gigabitových přenosů**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra telekomunikační techniky

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

Studijní program: Elektronika a komunikace

Praha 2022



## 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 .....

.....

Podpis autora



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Oplištil** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **491829**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Možnosti mobilních sítí pro realizaci požadavků gigabitových přenosů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Possibilities of mobile networks for the realization of gigabit transmission requirements**

Pokyny pro vypracování:

Zaměřte se na prognózu požadavků na datové přenosy rychlostmi blížícími se 1 Gbit/s (NGA a VHCN), vlastnosti variant technologií a metody měření. Analyzujte současnou situaci v ČR, proveďte praktické testy a následné vyhodnocení z hlediska požadavků na sítě a jejich splnění.

Seznam doporučené literatury:

[1] Ivan Lytvyn - Prognóza požadavků na datové přenosy gigabitové společnosti, diplomová práce, ČVUT v Praze, 2020  
[2] F-Tester - měření datových sítí, online: <https://f-tester.fel.cvut.cz>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

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

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

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta



## **Poděkování**

Velice děkuji svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Vodrážkovi, Ph.D. za nepostradatelné rady, ochotu a čas, který mi věnoval. Také děkuji své rodině za podporu při psaní bakalářské práce.





## Abstrakt

Tato bakalářská práce je věnována mobilním sítím 5G. Cílem je prozkoumat vlastnosti variant technologií blížící se k přenosové rychlosti 1 Gbit/s, analyzovat současnou situaci v České republice ohledně mobilních sítí 5G, zaměřit se na prognózu požadavků na datové přenosy, popsat metody měření datového připojení a provést měření mobilních sítí 5G NSA. Měření parametrů mobilních sítí 5G NSA proběhlo pomocí měřicího zařízení F-Tester 5G, které disponuje testy propustnosti pomocí protokolu TCP a UDP (Iperf3). Naměřené parametry byly zpracovány pomocí statistických metod a porovnány s výsledky prognózy pro rok 2025, která odhaduje nárůstu datových toků do roku 2025 pro domácí přípojky. Pro vzestupný směr, kde byly v pondělí, středu a neděli v pěti vybraných časech v panelovém domě naměřeny průměrné přenosové rychlosti mezi 20 a 74 Mbit/s, byly všechny hodnoty vyšší, než je závěrem prognózy. Pro sestupný směr, kde byly naměřeny průměrné přenosové rychlosti mezi 58 a 117 Mbit/s, byly hodnoty pro běžně dostupnou přenosovou rychlost, až na jednu, vyšší, než je závěrem prognózy. Z měření vyplývá, že parametry mobilních sítí jsou výrazně dynamické. Aby byla v České republice dosahovaná přenosová rychlost blížící se k 1 Gbit/s, je klíčové připojovat základnové stanice 5G optickými vlákny a zpřístupnit kmitočtové pásmo 26 GHz pro mobilní síť 5G.

**Klíčová slova:** mobilní síť 5G, přenosová rychlost, F-Tester, VHCN

## Abstract

This bachelor thesis deals with 5G mobile networks. The aim is to investigate the properties of various technologies approaching transmission speed of 1 Gbps, analyze the current situation in the Czech Republic considering 5G mobile networks, focus on forecasting data transmission requirements, describe methods of measuring data flow, and carry out measurements of 5G NSA mobile networks. The parameters of the 5G NSA mobile networks were measured with the F-Tester 5G, which has throughput tests using the TCP and UDP protocols (Iperf3). The measured parameters were analyzed using statistical methods and compared with the results of the forecast for 2025, which estimates the increase in data flows for the throughput of residential connections. For upstream, where average transmission speeds between 20 and 74 Mbps were measured during Monday, Wednesday, and Sunday in the panel house, all values were higher than the maximum value in the forecast. For the downstream, where average transmission speeds between 58 and 117 Mbps were measured during the day in the panel house, the values for the commonly available transmission speed were, except for one, higher than the maximum value in the forecast. The measurement implies that the parameters of mobile networks are significantly dynamic. In the Czech Republic, it is necessary to connect 5G base stations with optical fibers and make the 26 GHz frequency band available for 5G mobile networks, which enables users to approach the transmission speed of 1 Gbps.

**Keywords:** 5G mobile networks, transmission speed, F-Tester, VHCN



# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Úvod</b>   | <b>3</b>  |
| <b>1 Cesta ke gigabitové společnosti</b>                                    | <b>5</b>  |
| 1.1 Síť NGA . . . . .   | 5         |
| 1.2 Síť VHCN . . . . .  | 7         |
| 1.2.1 Architektura sítí VHCN . . . . .                                      | 8         |
| 1.2.2 Technologie pro budování sítí VHCN . . . . .                          | 9         |
| <b>2 Optické sítě</b>   | <b>11</b> |
| 2.1 Optická vlákna . . . . .  | 11        |
| 2.2 Optické kabely a konektory . . . . .                                    | 12        |
| 2.3 Pasivní optické sítě . . . . .  | 12        |
| 2.4 Technologie xWDM . . . . .  | 14        |
| <b>3 Mobilní sítě 5G</b>  | <b>15</b> |
| 3.1 Rozdělení kmitočtového spektra mobilních sítí 5G . . . . .              | 16        |
| 3.2 Zavedení mobilních sítí 5G do provozu . . . . .                         | 17        |
| 3.3 Architektura mobilních sítí 5G . . . . .                                | 18        |
| 3.4 Oblasti využití mobilních sítí 5G . . . . .                             | 19        |
| 3.4.1 eMBB . . . . .  | 19        |
| 3.4.2 URLLC . . . . .   | 19        |
| 3.4.3 mMTC . . . . .  | 20        |
| 3.5 Technologické součásti mobilních sítí 5G . . . . .                      | 20        |
| 3.5.1 mMIMO . . . . .   | 20        |
| 3.5.2 Beamforming . . . . .   | 20        |
| 3.5.3 Network Slicing . . . . .   | 21        |
| 3.5.4 Mobile Edge Computing . . . . .                                       | 21        |
| 3.6 5G FWA . . . . .  | 22        |
| 3.7 Požadavky na mobilní sítě 5G . . . . .                                  | 23        |
| <b>4 Analýza sítí 5G v ČR</b>   | <b>25</b> |
| 4.1 Stav pokrytí a poskytovaných služeb . . . . .                           | 25        |
| 4.2 Cíle České republiky . . . . .  | 28        |
| <b>5 Analýza datových přenosů</b>   | <b>29</b> |
| 5.1 Uživatelé a internetové služby . . . . .                                | 30        |
| 5.1.1 Multimediální služby . . . . .  | 31        |
| 5.1.2 Online hry . . . . .  | 31        |
| 5.1.3 Vzdělávací služby . . . . .   | 32        |
| 5.1.4 Cloudové služby . . . . .   | 33        |
| 5.1.5 Internet věcí . . . . .   | 33        |
| 5.1.6 Elektronické obchody, emaily, zpravodajství a sociální sítě . . . . . | 34        |
| 5.2 Prognózy požadavků na datové přenosy . . . . .                          | 34        |
| 5.3 Využití kapacity internetové přípojky běžným uživatelem . . . . .       | 36        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>6</b> | <b>Metody měření</b>                              | <b>37</b> |
| 6.1      | Měřicí nástroj NetTest . . . . .                  | 37        |
| 6.2      | Měření pomocí protokolu TCP . . . . .             | 38        |
| 6.2.1    | Stanovení velikosti TCP okna . . . . .            | 38        |
| 6.2.2    | Stanovení počtu TCP toků . . . . .                | 39        |
| 6.2.3    | Algoritmy pro zamezení zahlcení sítě . . . . .    | 39        |
| 6.3      | Měřicí nástroj FlowPing . . . . .                 | 40        |
| 6.4      | Měřicí nástroj Iperf3 . . . . .                   | 40        |
| 6.5      | Testované parametry sítí . . . . .                | 41        |
| 6.6      | Měřicí strany . . . . .                           | 42        |
| 6.7      | Průběh měření pevných sítí . . . . .              | 42        |
| 6.8      | Průběh měření mobilních sítí . . . . .            | 43        |
| 6.8.1    | Měření za jízdy . . . . .                         | 43        |
| 6.8.2    | Stacionární měření . . . . .                      | 44        |
| <b>7</b> | <b>Měření sítí 5G NSA</b>                         | <b>45</b> |
| 7.1      | Použité nástroje pro měření . . . . .             | 45        |
| 7.1.1    | F-Tester 5G . . . . .                             | 46        |
| 7.2      | Realizace zkušebních testů . . . . .              | 47        |
| 7.2.1    | Výsledky zkušebních testů . . . . .               | 51        |
| 7.2.2    | Vyhodnocení zkušebních testů . . . . .            | 53        |
| 7.3      | Vymezení měření . . . . .                         | 53        |
| 7.4      | Výsledky měření . . . . .                         | 54        |
| 7.5      | Vyhodnocení měření . . . . .                      | 70        |
|          | <b>Závěr</b>                                      | <b>73</b> |
|          | <b>Seznam použité literatury</b>                  | <b>75</b> |
|          | <b>Seznam obrázků</b>                             | <b>79</b> |
|          | <b>Seznam tabulek</b>                             | <b>81</b> |
|          | <b>Seznam použitých zkratk</b>                    | <b>83</b> |
| <b>A</b> | <b>Přílohy</b>                                    | <b>87</b> |
| A.1      | Ukázky z webového rozhraní F-Testeru 5G . . . . . | 87        |
| A.2      | Naměřená data vygenerovaná F-Testerem . . . . .   | 88        |

# Úvod

Tato bakalářská práce se především zabývá mobilními sítěmi 5G, které mají možnost dosahovat gigabitových přenosů. Studium nových technologií pro přenos dat je důležité, jelikož využívání internetového připojení stále roste a s ním i nároky na parametry, jako je například přenosová rychlost, zpoždění ve smyčce a ztrátovost paketů. Digitalizace dosáhla ve společnosti takové pozice, že je již nemyslitelné, aby se její rozvoj zpomalil nebo dokonce zcela zastavil. Klíčovým prvkem pro umožnění gigabitových přenosových rychlostí jsou sítě s velmi vysokou kapacitou, označované jako sítě VHCN [1].

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat vlastnosti variant technologií blížící se k přenosové rychlosti 1 Gbit/s, analyzovat současnou situaci v České republice ohledně mobilních sítí 5G, zaměřit se na prognózu požadavků na datové přenosy, popsat metody měření datového připojení a provést měření mobilních sítí 5G NSA pomocí měřicího zařízení F-Tester 5G, které disponuje testy propustností pomocí protokolů TCP a UDP (Iperf3).

Práce je rozdělena do sedmi kapitol. Kapitola 1 nastiňuje cestu ke gigabitové společnosti spolu s definicí sítí NGA a VHCN. V kapitole 2 a 3 jsou teoreticky popsány technologie pro budování VHCN sítí, tedy optické sítě a mobilní sítě 5G. Kapitola 4 obsahuje analýzu stavu mobilních sítí 5G v České republice, která popisuje stav pokrytí, služby a cíle. V kapitole 5 je analýza datových přenosů, zaměřená na prognózy požadavků na datové přenosy a zhodnocení využití kapacity internetové přípojky běžným uživatelem. Kapitola 6 popisuje metody měření datového připojení. Poslední kapitola 7 je věnována praktické části, která se zabývá měřením mobilních sítí 5G NSA.



# 1. Cesta ke gigabitové společnosti

Značný odklon od hlasových telefonních služeb a dynamický rozvoj nových technologií vyvolal v mnoha vyspělých zemích enormní zájem spotřebitelů o nové druhy digitálních služeb, které vytváří stále náročnější požadavky na telekomunikační síť. Ze strategických dokumentů Evropské komise plyne, že všechny evropské domácnosti by měly mít do roku 2025 přístup k přenosové rychlosti 100 Mbit/s, a to i s možností vylepšit síť tak, aby dosáhly vyšších přenosových rychlostí. Dále by stát měl zajistit pro školy, univerzity, výzkumná centra, nemocnice, dopravní uzly, orgány veřejné správy a pro podniky přístup ke gigabitovému připojení [1].

V České republice byl připraven strategický dokument *Národní plán rozvoje sítě s velmi vysokou kapacitou* [1], který již byl schválen vládou České republiky dne 1. 3. 2021. Jeho realizace zajistí rozvíjení gigabitové společnosti. Tento dokument zahrnuje analýzu přístupu k Internetu, analýzu poptávky po vysokorychlostních službách, strategické cíle, dotační opatření a popis implementace v České republice. *Národnímu plánu rozvoje sítě s velmi vysokou kapacitou* předcházela strategický dokument *Národní plán rozvoje sítě NGA* [2], od kterého se nastartovala cesta ke gigabitové společnosti.

## 1.1 Síť NGA

Motivací sítí NGA (Next Generation Access) bylo budování přístupových sítí, které se z hlediska své podstaty neomezují a ani do budoucna omezovat nebudou potřeby uživatelů datových sítí. Síť NGA se nevymezují konkrétním výčtem technologií, ale dají se vymežit základními vlastnosti [3]:

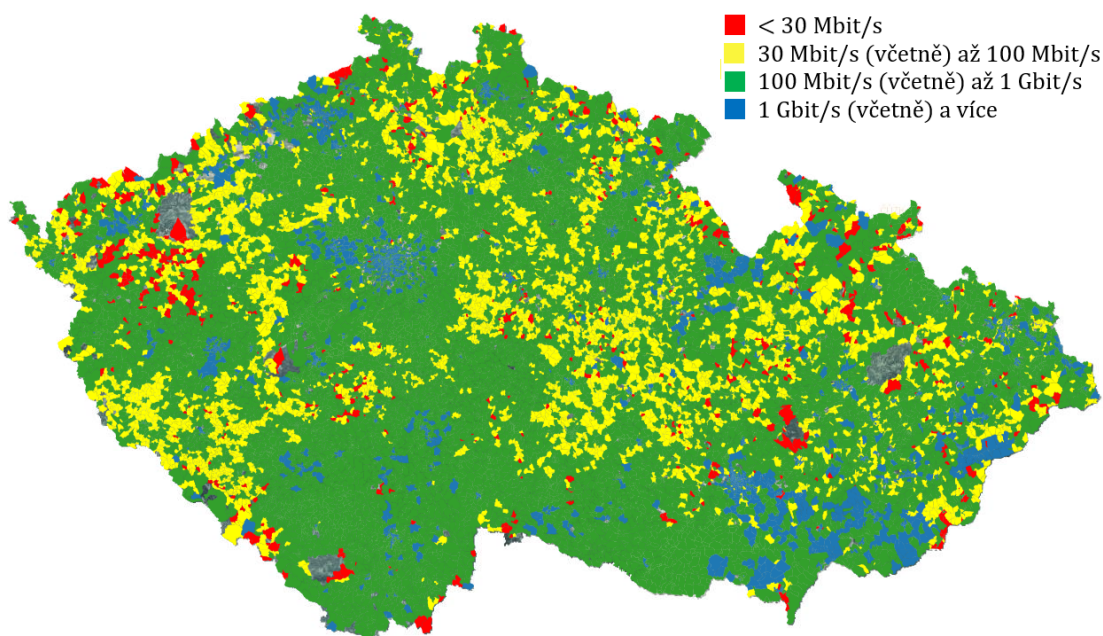
- spolehlivé poskytování služeb při zajištění vysoké rychlosti pro účastníka za pomoci optických vláken nebo jinou technologií dosahující srovnatelných parametrů s optickými vlákny,
- podpora vyspělých digitálních služeb na technologii IP,
- podstatně vyšší rychlost ve směru vzestupném ve srovnání se sítěmi, jako je ADSL2+ (Asymmetric Digital Subscriber Line), CATV (Cable Television) nebo mobilní síť třetí generace UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

Požadované vlastnosti sítí NGA splňují přípojky FTTx (Fiber To The x) založené na optických vláknech, kde se za písmeno „x“ dosazuje identifikátor umístění koncového bodu optické části přístupové sítě. Přípojky FTTx jsou realizovány čistě z optických vláken nebo jako hybridní přípojky opticko-metalické či opticko-rádiové. U přípojek FTTx, které jsou realizovány čistě z optických vláken, je optická přístupová síť zakončena až u uživatele, avšak vybudování této sítě vyžaduje vyšší náklady než v případě hybridní přípojky FTTx [3].

V současné době, zejména v České republice, je Wi-Fi (Wireless Fidelity) využívána i pro realizaci vzdálených připojení a venkovních směrových spojů. Řadí se mezi typické bezdrátové technologie, které se využívají v přístupových

sítích. Tento model připojení je hojně využíván kvůli nízkým nákladům na realizaci a také poskytuje dostačující přenosové parametry pro nenáročného uživatele, typicky je využívána symetrická přenosová rychlost 30 Mbit/s. V případě definice bezdrátových Wi-Fi sítí je nutné rozlišovat, zda se jedná o veřejnou datovou síť poskytovatele, která zajišťuje připojení koncového účastníka k Internetu nebo o lokální Wi-Fi síť [3].

Ve strategických dokumentech Evropské unie byl stanoven milník pro přenosové rychlosti v sestupném směru 30 Mbit/s pro všechny a 100 Mbit/s pro polovinu domácností do roku 2020, aby Evropa jako celek v této oblasti rostla a postupně se vyrovnávala s jinými zeměmi světa, které jsou v tomto ohledu napřed. Tyto vize byly zahrnuty do dokumentu *Národní plán rozvoje sítí NGA* [2]. Obrázek 1.1 zobrazuje pokrytí ZSJ (základní sídelní jednotka) podle nejvyšší deklarované rychlosti pro alespoň jedno adresní místo v dané ZSJ k 31. 12. 2020. V České republice se zahájila výstavba hybridních sítí, především typu FTTC (Fiber to the Curb) a pomocí optických vláken se začaly připojovat i základnové stanice (mobilní backhaul) [3].



**Obrázek 1.1:** Pokrytí ČR podle deklarované rychlosti [4].



## 1.2 Síť VHCN

Smyslem sítí VHCN (Very High Capacity Network) je vytvořit podmínky pro gigabitovou společnost do roku 2025. Tento typ sítí se skládá z optických komponent minimálně do distribučních bodů nebo ze sítí, které jsou schopny za obvyklých podmínek v době špičky dosahovat podobné výkonnosti jako optické sítě, což zahrnuje dostupnou přenosovou rychlost ve směru sestupném i vzestupném, chybovost a zpoždění při přenosu. Dále BEREC (Body of European Regulators for Electronic Communications) vydal čtyři kritéria pro zpřesnění definice sítí VHCN, kde stačí splnit alespoň jedno kritérium, aby se jednalo o tuto síť [1].

- **Kritérium 1:** Optické vlákno je dovedeno do budovy.
- **Kritérium 2:** U bezdrátového připojení je optické vlákno dovedené do základnové stanice.
- **Kritérium 3:** Parametry fixního připojení musí splňovat:
  - přenosová rychlost v sestupném směru  $\geq 1000$  Mbit/s,
  - přenosová rychlost ve vzestupném směru  $\geq 200$  Mbit/s,
  - ztrátovost IP paketů  $\leq 0,0025$  %,
  - chybovost IP paketů  $\leq 0,05$  %,
  - zpoždění IP paketu při přenosu  $\leq 10$  ms,
  - dostupnost služeb  $\geq 99,9$  % ročně.
- **Kritérium 4:** Parametry bezdrátového připojení musí splňovat:
  - přenosová rychlost v sestupném směru  $\geq 150$  Mbit/s,
  - přenosová rychlost ve vzestupném směru  $\geq 50$  Mbit/s,
  - ztrátovost IP paketů  $\leq 0,005$  %,
  - chybovost IP paketů  $\leq 0,01$  %,
  - zpoždění IP paketu při přenosu  $\leq 25$  ms,
  - dostupnost služeb  $\geq 99,81$  % ročně.

Přenos dat vysokou přenosovou rychlostí, s nízkou chybovostí a s nízkým zpožděním otevírá nové možnosti pro občany, domácnosti, průmyslové oblasti, zdravotnictví, vzdělávání nebo pro autonomní provoz dopravních prostředků. Síť VHCN představují důležité tepny propojující vazby mezi průmyslovými, dopravními, energetickými, sociálními, finančními a obchodními systémy. Dále jsou důležité pro zajištění optimálního rozvoje sítí 5G ve všech městských i venkovských oblastech a v hlavních dopravních koridorech. Budování sítí VHCN je spojeno s řadou potíží, jelikož výstavba se provádí na pozemcích různých subjektů. Složitost stavebních právních předpisů se výrazně projevuje na časové i finanční náročnosti výstavby potřebných liniových staveb [1].

Cílem České republiky je zařadit se mezi země, které jsou plně připravené na gigabitovou společnost, a to díky budování sítí VHCN. To znamená, že je nutné

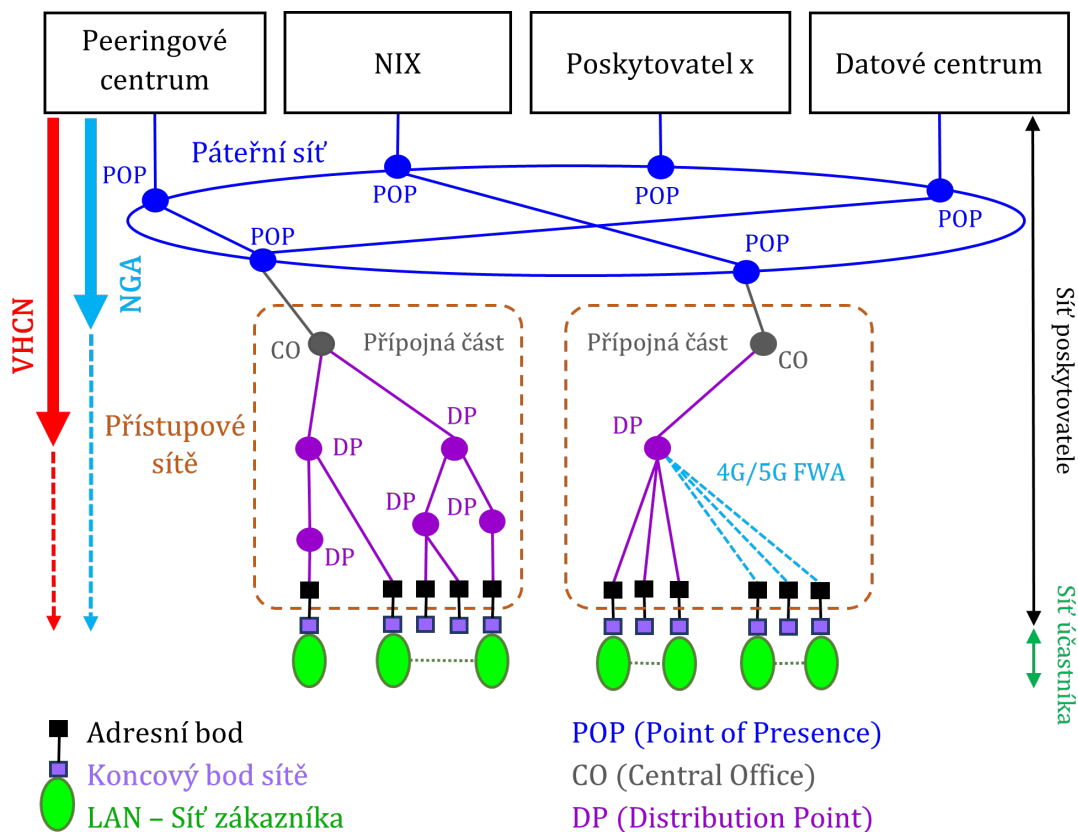
zajistit v maximální možné míře přístup k elektronickým službám pro obyvatele, podnikatele, školy, nemocnice, výzkumná střediska, dopravní uzly, instituce veřejné správy a dosáhnout tak stavu, aby bylo možné bez omezení využívat potenciál nových technologií. Strategické cíle a priority rozvoje sítě VHCN včetně způsobu financování pro Českou republiku do roku 2027 obsahuje strategický dokument *Národní plán rozvoje sítě s velmi vysokou kapacitou* [1]:

- Mají se vybudovat robustní infrastruktury datových sítí s parametry sítě VHCN primárně pro všechny lokality, které představují hlavní tepnu sociálního a ekonomického rozvoje České republiky, a také v lokalitách, ve kterých infrastruktura vysokokapacitních sítí dosud nebyla vybudována.
- Domácnostem v městských nebo venkovských oblastech se mají zajistit přenosové rychlosti minimálně 100 Mbit/s s možností dosažení až gigabitové rychlosti přenosu v sestupném směru.
- Mají se zajistit minimálně gigabitové přenosové rychlosti v obou směrech podnikatelským subjektům, státní správě a územní samosprávě.
- Má se umožnit vysokorychlostní přístup k Internetu v místech, ve kterých provozní výnosy nepokryjí provozní náklady poskytovatelům služeb přístupu k Internetu.
- Mají se vytvořit podmínky pro mobilní síť 5G v hlavních dopravních korydorech a ve všech městských i venkovních oblastech.

### 1.2.1 Architektura sítě VHCN

Architektura sítě VHCN je zobrazena na obrázku 1.2. V ideálním případě je pro budování těchto sítí využíváno optické vlákno. Předpokládá se, že optické vlákno bude vedené minimálně do distribučních bodů nebo v lepším případě bude dovedeno až na hranu budovy nebo až do koncového bodu sítě. Páteřní síť koncentruje provoz z přístupových sítí, propojuje uzly PoP (Point of Presence) regionálních nebo metropolitních sítí, zajišťuje napojení na peeringová centra, vlastní či cizí datová centra a napojení na síť ostatních poskytovatelů. Uzly PoP obsahují aktivní prvky jako jsou například směrovače a servery. Jsou přes ně realizovaná připojení poskytovatelů, připojení do Internetu a do jednotlivých přístupových sítí. Základním uzlem každé přístupové sítě je CO (Central Office). Tento uzel pokrývá oblast velikosti města, obce nebo několika sousedících obcí. V případě, že se uzel CO nenachází v místě, kde je zároveň uzel PoP, tak je konektivita mezi nimi zajištěna pomocí přípojné části (backhaul) [5].

Od uzlu CO začíná distribuční část přístupové sítě, která může být víceúrovňová. Uzly mezi těmito úrovněmi jsou označovány jako DP (Distribution Point), které propojují jednotlivé části konektivity na cestě ke koncovému bodu sítě. DP uzly mohou být jak aktivní (například DSLAM – Digital Subscriber Line Access Multiplexer), tak pasivní (například optické rozbočovače). DP uzly jsou mezi CO a koncovým bodem sítě u uživatele ve specifickém adresním bodě, který tvoří lokální síť účastníka [5].



Obrázek 1.2: Architektura sítě VHCN [5].

## 1.2.2 Technologie pro budování sítí VHCN

Nejperspektivnější technologií pro budování sítí VHCN jsou optické sítě, které jsou popsány v kapitole 2. Pomocí nových technologií nebo za pomoci optických vláken se mohou metalické sítě řadit mezi „gigabit ready“ technologie:

- CATV (Cable Television) – DOCSIS 3.1 full duplex 10G,
- Gigabit DSL (G.fast),
- Multi-Gigabit DSL (G.mgfast).

Technologie Gigabit DSL (G.fast) nebo Multi-Gigabit DSL (G.mgfast) na symetrickém vedení jsou typy přípojek xDSL (Digital Subscriber Line), které mají dosah do 100 m, a kvůli tomu je nutné například využít hybridní přístupové sítě, jako jsou například přípojky FTTB (Fiber To The Building), FTTC (Fiber To The Curb) nebo FTTdp (Fiber To The Distribution Point). Metalické kabely se využívají až v domovních rozvodech právě kvůli jejich limitovanému dosahu. Takovéto hybridní sítě jsou z finančního hlediska výhodné, nicméně z budoucího hlediska je snaha tyto sítě postupně nahrazovat plně optickými sítěmi, kvůli jejich vlastnostem [3].

Ve vývoji je přípojka TDSL (Terabit DSL) u které se předpokládá dosažení přenosové rychlosti 1 Tbit/s na 100 m, 100 Gbit/s na 300 m a 10 Gbit/s na 500 m. Přípojka TDSL by se dala využít pro připojení základnových stanic 5G, ke kterým není z ekonomického hlediska efektivní dovést optická vlákna [3].

Další možností pro budování sítí VHCN je využití technologií pro bezdrátový přenos:

- Wi-Fi (60 GHz),
- WTTB (80 GHz),
- FSO,
- 5G FWA.

Technologie Wi-Fi (Wireless Fidelity) tvořící spoje v pásmu 60 GHz je využívána na 100 až 300 m. WTTB (Wireless to the Building) představuje point-to-point spoj pracující v pásmu od 80 GHz s dosahem do jednotek kilometrů. FSO (Free Space Optics) pracuje podobným způsobem jako vláknová optika a technologie 5G FWA (Fixed Wireless Access) využívá mobilní sítě 5G, které jsou popsány v kapitole 3.

## 2. Optické sítě

Optické sítě se využívají k řešení páteřních telekomunikačních sítí a postupně pronikají i do přístupových sítí. Zásadním důvodem rozvoje optických přístupových sítí je stále navyšování požadavků na přenosovou rychlost ze strany koncových uživatelů [3]. Díky svým technickým parametrům jsou nejperspektivnější technologií pro budování sítí VHCN. Nevýhodou optických sítí je, že jejich výstavba je finančně, organizačně a administrativně náročná, avšak investovat do nich se vyplatí, protože optické sítě dokážou do budoucna naplnit potřeby mnohonásobně vyšší, než jsou dnes. V těchto sítích je nutné dbát na vysokou míru spolehlivosti a fyzické bezpečnosti, jelikož výpadek v těchto sítích bývá kritickým při poskytování služeb, a proto jsou tyto sítě většinou stavěné na zálohované kruhové topologii, kde fyzický výpadek v jednom místě nezpůsobí přerušení poskytovaných služeb [1].

Investice do optických sítí jsou velmi nákladné, a proto je snaha o přechod na optické sítě postupná. Znamená to, že se optické vlákno postupně přibližuje až ke koncovému uživateli. Nebудuje se ihned kompletní optické propojení k zákazníkovi. V následujícím období lze očekávat postupné pokrývání méně lukrativních oblastí a další přibližování optické infrastruktury k zákazníkovi, tedy například přechod z FTTC (Fiber To The Curb) nebo FTTB (Fiber To The Building) na FTTH (Fiber To The Home) [3].

Obecný optický přenosový řetězec se skládá z optického vysílače, optického přijímače, optického média a z pasivních i aktivních prvků. Jako optické vysílače a přijímače optických signálů slouží optické SFP (Small Form-factor Pluggable) transceivery (transmitter + receiver). Podporují Ethernet a další komunikační standardy. V přední části optické součástky SFP nalezneme dvě části a sponu. SFP transceivery mají mnoho parametrů, kterými se od sebe mohou lišit, jako je například vlnová délka, dosah svitu, přenosová rychlost, citlivost nebo typ konektoru [3].

### 2.1 Optická vlákna

Mezi klíčové výhody optického vlákna patří velká přenosová kapacita, odolnost proti elektromagnetickému i rádiovému rušení, malý měrný útlum, bezpečný přenos dat a malé rozměry [3]. V roce 2021 byla v Japonsku na optické trase dlouhé více než 3000 km naměřena rekordní přenosová rychlost 319 Tbit/s [6].

Optická vlákna se díky své přenosové kapacitě stala nepostradatelnými pro páteřní sítě. V páteřních sítích se využívají optická vlákna jednovidová, protože ta umožňují přenos na velké vzdálenosti s nízkým útlumem. Je vhodné připojovat základnové stanice 5G pomocí optických vláken (mobilní backhaul), aby nevzniklo úzké hrdlo a nedošlo tak k omezení služeb mobilních sítí 5G [3].

## 2.2 Optické kabely a konektory

Optické kabely obsahují minimálně jedno optické vlákno, které je již v primární i sekundární ochraně. Optický kabel se ještě skládá z tahových prvků, jako je kevlar nebo ocelové struny. Tento celý obsah je umístěn v plášti kabelu, který jej chrání před vnějšími vlivy. Optické kabely se rozdělují například dle počtu optických vláken, konstrukčního uspořádání, způsobu řešení ochranných vrstev, místa využití (budovy či venkovní prostředí) nebo podle toho, zda obsahují pouze optická vlákna či jsou kombinované s metalickými vodiči [3].

Optické konektory mají využití v místech, ve kterých opakovaně dochází k spojování nebo rozpojování optických vláken. To nastává zpravidla v účastnických zásuvkách, rozvaděčích nebo v koncových bodech sítě. Spojená optická vlákna musí být v konektoru umístěna proti sobě takovým způsobem, aby došlo k navázání maximálního optického výkonu. Mezi důležité parametry optických konektorů patří co nejmenší vložný útlum, velký útlum odrazu a vysoká životnost [3].

## 2.3 Pasivní optické sítě

Pasivní optické sítě PON (Passive Optical Network) umožňují připojit spoustu uživatelů na vzdálenost desítek kilometrů. Bylo navrženo a vybudováno mnoho variant PON sítí (viz tabulka 2.1). První generace PON sítí obsahuje APON, BPON, GPON a GEAPON. Do desetigigabitové skupiny patří 10GEAPON, XGPON a XGS-PON. Pokračovatelé 10GEAPON jsou 25GEAPON s celkovou sdílenou kapacitou 25 Gbit/s, 50GEAPON s celkovou sdílenou kapacitou 50 Gbit/s a 100GEAPON s celkovou sdílenou kapacitou 100 Gbit/s [3].

Mezi nejnovější a nejpokročilejší varianty se řadí verze NG-PON2 založená na aplikaci WDM multiplexu na rozdíl od předešlých variant, které jsou založené na časovém sdílení TDM. Verze NG-PON2 může za předpokladu využití 8 vlnových délek potenciálně dosáhnout přenosové rychlosti přibližně 80 Gbit/s. Prozatím jsou standardizovány 4 vlnové délky, takže NG-PON2 nabízí sdílenou kapacitu 40 Gbit/s [3].

TDM PON sítě se skládají z optické distribuční sítě, optické přístupové sítě, optického linkového zakončení, optického síťového zakončení a z optické síťové jednotky. Optické distribuční sítě mají typicky hvězdicovou nebo stromovou topologii a skládají se z optických vláken, optických rozbočovačů, vlnových filtrů, konektorů, spojek a svarů. Optická přístupová síť je seskupení distribučních sítí, které jsou připojeny k jednomu centrálnímu uzlu. Optické liniové zakončení je prvek, jenž zakončuje optickou distribuční síť na straně operátora a zajišťuje dohled i správu nad připojenými koncovými uživatelskými jednotkami. Optické síťové zakončení je koncový prvek na straně účastníka a adaptuje komunikační protokoly mezi sítí PON a rozhraním koncového uživatele. Optická síťová jednotka je označení koncového zařízení na uživatelské straně PON sítě, které zprostředkovává připojení koncového uživatele prostřednictvím navazující na metalické nebo bezdrátové sítě [3].

Nepostradatelnou součástí PON sítí jsou pasivní optické rozbočovače alias splitters. Vždy mají pouze jeden vstup a  $n$  výstupů, kde  $n$  je obvykle mocninou čísla 2, avšak existují i asymetrické rozbočovače se 3 nebo 6 výstupy. Optické rozbočovače jsou běžně v poměru 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64, 1:128 nebo 1:256.

V sestupném směru optické rozbočovače rozdělují vstupní optický signál z optického liniového zakončení do všech směrů ke koncovým jednotkám. Naopak ve vzestupném směru optický rozbočovač slučuje jednotlivé optické signály od koncových jednotek do společného výstupu optického liniového zakončení [3].

**Tabulka 2.1:** Varianty pasivních optických sítí [3].

| Varianty<br>(označení)           | Maximální<br>přenosová<br>rychlost<br>ve vzestupném<br>směru | Maximální<br>přenosová<br>rychlost<br>v sestupném<br>směru | Maximální<br>počet<br>koncových<br>uživateli | Maximální<br>fyzický<br>dosah<br>[km] |
|----------------------------------|--|--|--|---------------------------------------|
| APON                             | 155,52 Mbit/s  | 622,08 Mbit/s  | 32   | 20                                    |
| BPON                             | 622,08 Mbit/s  | 1244,16 Mbit/s   | 32   | 20                                    |
| GPON                             | 1,24416 Gbit/s   | 2,48832 Gbit/s   | 128  | 20                                    |
| GEPON<br>(100BASE-PX10)          | 1,25 Gbit/s  | 1,25 Gbit/s  | 16   | 10                                    |
| GEPON<br>(100BASE-PX20)          | 1,25 Gbit/s  | 1,25 Gbit/s  | 32   | 20                                    |
| 10GEPON<br>(10GBASE-PR)          | 10,3125 Gbit/s   | 1,25 Gbit/s  | 32   | 20                                    |
| 10GEPON<br>(10/1GBASE-PRX)       | 10,3125 Gbit/s   | 10,3125 Gbit/s   | 32   | 20                                    |
| XG-PON1                          | 2,48832 Gbit/s   | 9,95328 Gbit/s   | 256  | 60                                    |
| XG-PON2                          | 9,95328 Gbit/s   | 9,95328 Gbit/s   | 256  | 60                                    |
| NG-PON2 (pro<br>1 vlnovou délku) | 9,95328 Gbit/s   | 9,95328 Gbit/s   | 256  | 40                                    |

## 2.4 Technologie xWDM

Technologie xWDM jsou založeny na vlnovém multiplexování, což umožňuje přenášet jedním optickým vláknem, dlouhým několik kilometrů, až stovky optických signálů, které jsou odděleny vlnovými délkami. Prvním příkladem vlnového multiplexování je CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing). Jméno této technologie „hrubé vlnové multiplexování“ vystihuje široké kanály a dostatečnou toleranci pro oddělování jednoduchých nosných vlnových délek. První střed nosné vlnové délky je 1271 nm a poslední střed nosné vlnové délky je 1611 nm. Mezi jednotlivými nosnými vlnovými délkami je mezera široká 20 nm, což činí 18 kanálů [3].

Základní princip přenosu optického signálu po CWDM lince je následující: Optický signál se pomocí SFP transceiveru vyšle na CWDM linku, který je veden přes útlumový článek, ve kterém se sníží výkon optického signálu na požadovanou úroveň. Poté se daný optický signál sloučí s ostatními optickými signály pomocí WDM multiplexoru do jednoho optického vlákna. Ve WDM demultiplexoru se naopak rozdělí a pomocí fotodiody v SFP transceiveru jsou optické signály přijímány a následně zpracovávány.

Druhým příkladem vlnového multiplexování je DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), které funguje na stejném principu jako CWDM, avšak jsou zde zřetelné rozdíly. U DWDM jsou definovány čtyři druhy výrazně užších kanálů s menší tolerancí. První kanál má šířku svazku 12,5 GHz s rozpětím vlnových délek 0,1 nm, druhý kanál má šířku svazku 25 GHz s rozpětím 0,2 nm, třetí kanál má šířku svazku 50 GHz s rozpětím 0,4 nm a čtvrtý kanál má šířku svazku 100 GHz s rozpětím 0,8 nm [3].

V praxi se DWDM využívá převážně v páteřních sítích, protože zvládne přenést optický signál vysokou přenosovou rychlostí na vzdálenosti až tisíce kilometrů. Naopak CWDM se využívá zejména v metropolitních sítích na vzdálenost řádově desítek kilometrů. Výhodou DWDM je větší počet uživatelských kanálů na rozdíl od CWDM, kde je možnost využít maximálně 18 kanálů. Nevýhodou DWDM je nutnost používat tepelně stabilizované zdroje s úzkou spektrální charakteristikou, což je velice drahá záležitost oproti CWDM, které je jednodušší na realizaci a na provoz stačí levné nechlazené optické zdroje [3].

Dále se při realizaci DWDM linky nesmí opomenout výrazný šum, který vzniká kvůli optickým zesilovačům. Ty jsou nezbytné pro realizaci DWDM spojů na dlouhou vzdálenost. Jedná se o aktivní prvky určené pro zesílení optického signálu. Na optické lince jsou optické signály z vysílačů zeslabovány délkou optických vláken a dalšími optickými součástkami jako jsou například optické multiplexory či demultiplexory. Na optických linkách se mohou využívat vláknové zesilovače EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), polovodičové zesilovače SOA (Semiconductor Optical Amplifier) nebo zesilovače na principu Ramanova jevu [3].



## 3. Mobilní sítě 5G

Mobilní sítě jsou nejdynamičtěji se rozvíjející částí informačních a komunikačních technologií. Vyvíjí se již mnoho desetiletí. Od počátku 90. let minulého století prošly mobilní sítě intenzivním vývojem (viz tabulka 3.1). Existuje již spousta generací a mezigenerací, protože v určitém bodě se vždy narazí na limit dané generace a technologie i hardware se musí vylepšit tak, aby byl zejména umožněn vyšší datový přenos. Vývoj mobilních sítí je již od samého počátku cílen na mobilitu, rozšiřování datové komunikace a na zajištění snadnějšího přístupu k internetovému připojení.

Mobilní sítě spolu s vlastní přístupovou rádiovou částí zahrnují kompletní infrastrukturu sítě, která umožňuje plošně poskytovat službu při neustále měnící se poloze uživatelského zařízení. Infrastrukturu mobilních sítí tvoří buňkový systém, který spočívá v rozdělení území na menší oblasti (buňky) obsluhované základnovou stanicí. Operátoři dostávají jen omezený příděl kmitočtů na základě individuálních licencí [7].

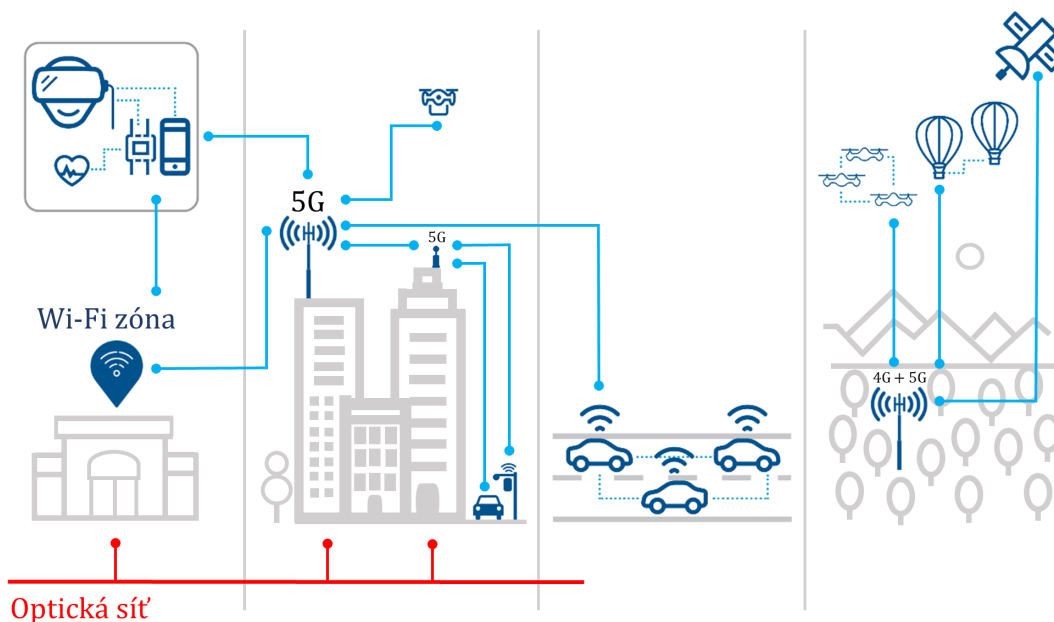
**Tabulka 3.1:** Přenosové rychlosti mobilních generací [7, 8].

| Mobilní generace | Typ technologie | Přenosové rychlosti ve vzestupném směru | Přenosové rychlosti v sestupném směru |
|------------------|-----------------|---|---------------------------------------|
| 2G               | GSM             | 14 kbit/s                               | 14 kbit/s                             |
|                  | GRPS            | 171 kbit/s                              | 171 kbit/s                            |
| 3G               | UMTS            | 384 kbit/s                              | 2048 kbit/s                           |
|                  | HSUPA/ HSDPA    | 6 Mbit/s                                | 15 Mbit/s                             |
| 4G               | LTE             | 50 Mbit/s                               | 100 Mbit/s                            |
|                  | LTE-A           | 50 až 75 Mbit/s                         | 500 Mbit/s                            |

Mobilní sítě 5. generace (5G) jsou nezastupitelnou částí vysokokapacitních sítí a jejich rozmach představuje celosvětový fenomén. Cílem 5G je posunout kvalitu datových služeb, přinést nové možnosti pro vývoj měst, domácností nebo podniků a posílit ekonomiku států. Zásadní je vyšší přenosová rychlost, velmi nízké zpoždění a zároveň přes mobilní sítě bude umožněno využívat širší spektrum aplikací i služeb. Pro připojení do mobilní sítě 5G je nutné být na území, které je pokryté signálem 5G, mít aktivovaný specifický tarif, SIM kartu a koncové zařízení podporující 5G.

Mobilní sítě 5G již nejsou pouze o komunikaci lidí, ale především i o komunikaci strojů a dalších elektronických zařízení mezi sebou (viz obrázek 3.1). To znamená, že služby mobilních sítí 5G nejsou primárně určeny pro obyvatele,

ale jsou směřovány do všech oblastí jako je například průmysl, doprava, zdravotnictví či zemědělství, jelikož v tomto prostředí služby mobilních sítí 5G nabízí, kromě vysokorychlostního přenosu dat, velmi nízké zpoždění, pokrytí velkého množství prvků IoT (Internet of Things) a hlavně zapojení umělé inteligence do procesů. Zvýšení počtu připojených zařízení i datových objemů přinese nové výzvy v oblasti kybernetické bezpečnosti [9].



Obrázek 3.1: Příklad mobilních sítí 5G [10].

### 3.1 Rozdělení kmitočtového spektra mobilních sítí 5G

Nejvýznamnější změnou mobilních sítí 5G je využívání jiných částí kmitočtového spektra. Ve všech generacích, od 1G až po 4G, se používaly pro přenos dat signály s kmitočty přibližně od 0,15 GHz až do 2,6 GHz. Mobilní sítě 5G se částečně přesunuly do vyšších kmitočtů. Čím vyšší kmitočet signálu, tím širší kmitočtové pásmo bývá k dispozici, tím vyšší je i přenosová rychlost a možnost přenášet více dat, ale zároveň je nižší dosah a snadněji dojde k rušení signálu. V Evropě byla pro zavádění mobilních sítí 5G vyčleněna pásma 700 MHz, 3,4 až 3,8 GHz a 26 GHz [11], která jsou vhodná pro různá nasazení kvůli svým vlastnostem (viz obrázek 3.2).

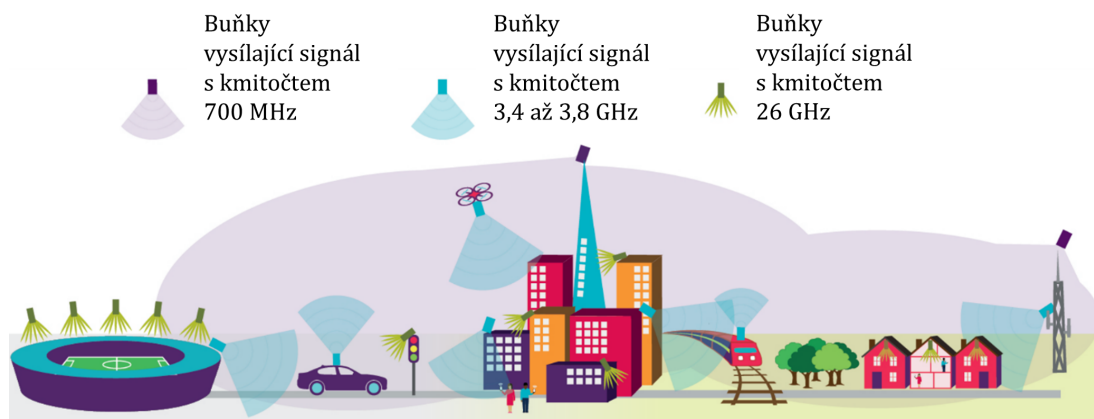
Architektura 5G podporuje tři kmitočtová pásma a to nízké (low-band), střední (mid-band) a vysoké (high-band). Každé z těchto kmitočtových pásem má jiné vlastnosti, které slouží jednotlivým aspektům různých odvětví mobilních sítí 5G [11]. 5G low-band pracuje pod kmitočtem 2 GHz, a tedy využívá pásmo, které je také používáno ve 4G. Poskytuje široké pokrytí určitého území, díky výbornému šíření přes překážky na tomto kmitočtu s poměrně nízkým útlumem a zároveň je komunikace na delší vzdálenosti energeticky výhodná i vysoce spolehlivá. 5G low-band se využívá tam, kde není nutnost obsloužit velký počet uživatelů, protože

nevýhodou tohoto pásma je nízký objem přenosu dat za čas a vysoké zpoždění při přenosu oproti vyšším kmitočtovým pásmům [13].

5G mid-band pracuje v rozsahu 2 až 6 GHz a využívá se v městské a příměstské oblasti. Toto kmitočtové pásmo má špičkové přenosové rychlosti ve stovkách Mbit/s. Díky kratší vlnové délce je zde umožněno vytvářet víceprvkové antény, což umožňuje nasadit technologii beamforming. Dosah je však o něco menší, než tomu je v 5G low-band [9].

5G high-band kmitočty se pohybují od 24 GHz do přibližně 100 GHz. Využívají milimetrové vlny a díky nim přenášejí masivní množství dat v řádech gigabitů za sekundu při velmi nízkém zpoždění velkému množství uživatelů sítě. Tyto nové a příznivé vlastnosti jsou vykoupeny krátkým dosahem signálů v řádech stovek metrů. Elektromagnetické vlny mají na vysokých kmitočtech malý dosah a dochází k blokadě téměř každou překážkou jako je stěna, strom či kapky deště. Nezbytně to neznamená, že zařízení musí přímo vidět 5G anténu, protože díky odrazům signálu může zařízení být za nějakou budovou a stále by se měl 5G high-band signál přijímat [9].

Pro využívání signálů s vysokými kmitočty je nutnost vybudovat mnoho malých základnových stanic (small cells) napojených ideálně na optickou síť, které tvoří malé buňky o velikostech desítek až stovek metrů. Především se umísťují na různé sloupky, zdi budov či na střechy a musí být umístěny blíže k zemi, než tomu bylo v předešlých mobilních generacích [13].



**Obrázek 3.2:** Příklad využití 5G pásem pro různé aplikační scénáře [12].

## 3.2 Zavedení mobilních sítí 5G do provozu

Vždy nastane časové období, během kterého se využívá několik generací mobilních sítí najednou a zde nenastává výjimka, takže nějakou dobu bude 5G koexistovat s 4G. Důvodem je, že vývoj a nasazování nových síťových technologií vyžaduje obrovské množství času, investic a spolupráci jednotlivých subjektů.

Zavedení mobilních sítí 5G je rozděleno na dvě etapy. První etapa, kdy 5G koexistuje s 4G, se nazývá jako nesamostatný režim NSA (Non-Standalone), který v současnosti (2022) všude na světě převažuje. 4G a 5G sdílejí stejné kmitočty, což umožňuje jednodušší přechod mezi generacemi. Pomocí metody dynamického sdílení spektra sítě rozdělí dostupnou šířku pásma a dynamicky se rozhodne jaký

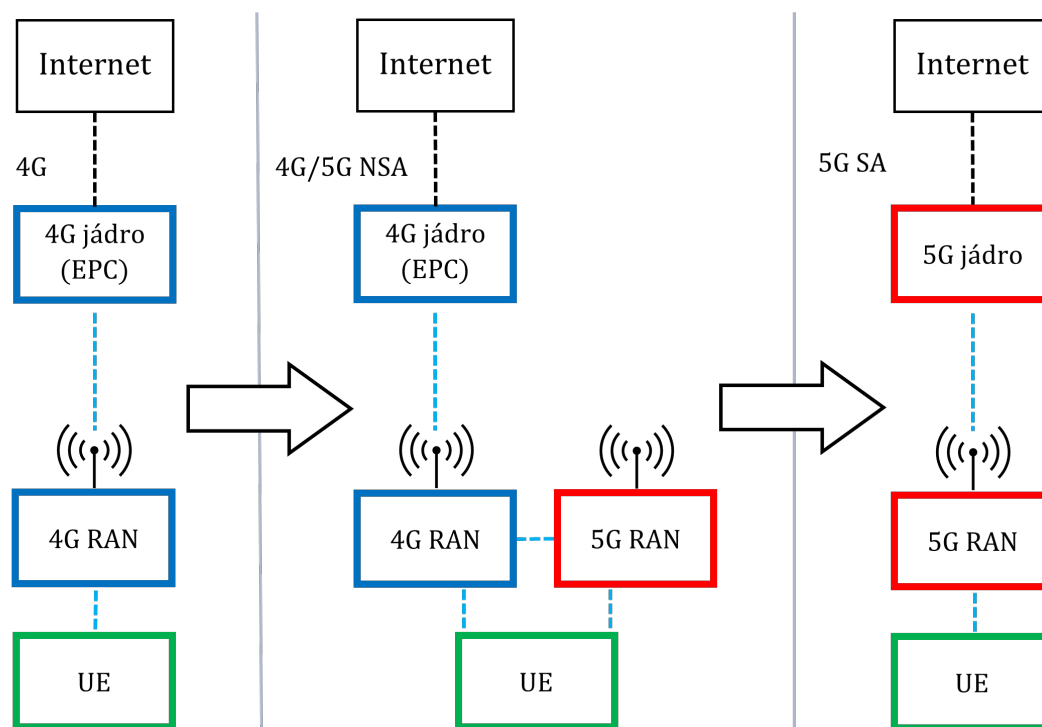
standard se využije. Například účastník sítě s mobilním telefonem disponující 5G v okruhu antény s dynamickým sdílením spektra bude využívat služby 5G, ale pokud by jeho telefon nepodporoval 5G, tak by využíval služby 4G [14].

Druhá etapa předpokládá vývoj tak, aby byl umožněn pouze 5G samostatný režim SA (Standalone). To znamená, že v této etapě jsou mobilní sítě 5G zcela nezávislé na mobilních sítích 4G. Objem dat přenášený mobilními sítěmi 5G vyžaduje vysokokapacitní připojení základnových stanic (mobilní backhaul). Znamená to tedy, že předpokladem pro úspěšné provozování mobilních sítí 5G je připojení základnových stanic pomocí optických vláken, aby nevzniklo úzké hrdlo, které by limitovalo služby mobilních sítí 5G.

### 3.3 Architektura mobilních sítí 5G

Mobilní sítě 5G se v samostatném režimu SA skládají z jádra (Core Network), rádiové přístupové sítě (Radio Access Network – RAN) a z uživatelského zařízení (User Equipment – UE), viz obrázek 3.3. 5G jádro zajišťuje autentizaci, zabezpečení, správu relací a agregaci provozu z připojených zařízení. Uživatelské stanice, jako například mobilní telefony podporující 5G, jsou propojeny přes 5G RAN do jádra 5G, které je propojeno s Internetem [11].

Jádro 4G bylo navrženo pro přenášení dat hlavně z mobilních telefonů či tabletů. U 5G se již počítá se širší skupinou různých zařízení, jako jsou například vozidla, domácí spotřebiče a další zařízení disponující elektronikou, softwarem, pohyblivými částmi, senzory a síťovou konektivitou, která umožňuje těmto zařízením se propojit a vyměňovat si navzájem data. Tedy jádro 5G je flexibilní oproti předešlým generacím.



Obrázek 3.3: Architektura 5G sítě [11].

## 3.4 Oblasti využití mobilních sítí 5G

Využití mobilních sítí 5G je velmi rozsáhlé a týká se teoreticky všech oblastí národního hospodářství a mnoha oblastí života občanů. Mobilní služby a vylepšené i nové aplikace budou moci těžit z vysoké přenosové rychlosti a zejména z velmi nízkého zpoždění při přenosu. Mobilní síť 5G umožní širokou škálu možností, jako jsou například chytrá města, inteligentní dopravní systémy, e-Vzdělání, elektronické zdravotnictví, chytré zemědělství, komunikace se záchrannými složkami a Průmysl 4.0 [9].

Mezinárodní telekomunikační unie (ITU – International Telecommunication Union) definuje tři oblasti využití mobilních sítí 5G. První oblast tvoří pokročilé mobilní vysokorychlostní síť (eMBB), druhá pokrývá vysoce spolehlivé komunikace s nízkým zpožděním (URLLC) a poslední oblast zahrnuje masivní komunikace mezi stroji či zařízeními (mMTC) [9].

### 3.4.1 eMBB

Pokročilé mobilní vysokorychlostní síť (eMBB – enhance Mobile Broadband) zaručují vysokorychlostní přístup k Internetu. Vlastnostmi této oblasti jsou dostupná internetová data v kteroukoliv dobu, mobilita je přibližně 500 km/h a maximální přenosová rychlost dat činí 10 až 20 Gbit/s [9].

Příkladem využití jsou multimediální služby s vysokým rozlišením, jako jsou videohovory, přenos záznamů z bezpečnostních kamer, streamování 4K i 8K videa a využívání virtuální reality. Dále se webové stránky načítají téměř instantně a stahování filmů ve 4K rozlišení či objemných her trvá pouze pár sekund. Oblast eMBB se využívá u nesamostatného režimu NSA [9].

### 3.4.2 URLLC

Vysoce spolehlivé komunikace s nízkým zpožděním (URLLC – Ultra Reliable and Low Latency) zabezpečují vysokou spolehlivost datového přenosu s nízkým zpožděním, jak vyplývá z názvu. Aplikovat URLLC bude umožněno až v druhé etapě vývoje mobilních sítí 5G (Standalone). Zpoždění na rádiovém rozhraní je do 1 ms a mezi koncovými body do 5 ms. Spolehlivost 99,999 % je dosažena v rozsahu datových rychlostí 50 kbit/s až 10 Mbit/s [9].

URLLC je nezbytné pro aplikace a zařízení, která jsou citlivá na dobu zpoždění, jako jsou například robotické operace, komunikace v silniční dopravě, řízení bezpilotních letadel, monitorování vitálních dat, inteligentní výroby nebo hraní počítačových her přes cloudové služby [9]. Myšlenka hraní počítačových či mobilních her, které vyžadovaly drahý hardware, přes streaming obrazu z cloudu existovala již před 5G, ale úskalí spočívalo v nízké kvalitě připojení uživatelů. Tuto myšlenku podpoří 5G díky nízké odezvě a herní zážitek bude, jako by hra byla přímo spuštěna na zařízení u uživatele.

### 3.4.3 mMTC

Masivní komunikace mezi stroji či zařízeními (mMTC – Massive Machine Type Communication) umožňuje propojení velkého množství zařízení k mobilní síti 5G. Řádově se jedná až o milion zařízení na 1 km<sup>2</sup> s přenosovou rychlostí 1 až 100 kbit/s na jedno zařízení [9].

Příkladem využití jsou aplikace pro zdraví, Průmysl 4.0, inteligentní logistiky, monitorování prostředí nebo inteligentní zemědělství. Aplikovat mMTC bude umožněno v druhé etapě vývoje mobilních sítí 5G (5G Standalone). Díky mMTC zastávají mobilní sítě 5G důležitou roli v IoT [9].

## 3.5 Technologické součásti mobilních sítí 5G

Pro splnění cílů mobilních sítí 5G, jako je vysokorychlostní přenos dat, snížení zpoždění při přenosu a zvýšení počtu koncových zařízení, tak je nutné zavést do provozu mnohem sofistikovanější technologické součásti, mezi které se řadí především technologie mMIMO, beamforming, Network Slicing a Mobile Edge Computing.

### 3.5.1 mMIMO

mMIMO (masive Multiple Input Multiple Output) je technologie, ve které se antény skládají z masivního počtu miniaturních transceiverů. 3GPP (3rd Generation Partnership Project) definuje mMIMO v případě, že anténa obsahuje více jak 16 transceiverů. Počet transceiverů v 5G zařízeních je typicky 16, 32, 64 nebo 128 [14]. mMIMO je důležitý pilíř pro zajištění požadavků 5G. Přispívá nejprve ke zvýšení kapacity tím, že umožňuje nasazení ve vyšším kmitočtovém rozsahu a za druhé poskytuje uživatelům využívat stejné časové a frekvenční zdroje ve stejnou dobu [15].

### 3.5.2 Beamforming

Beamforming je další důležitá technologie, která se významně podílí na zvýšení kapacity vysílací antény (obslouží mnohem více účastníků v rámci jedné buňky), minimalizaci interferencí, nárůstu energetické účinnosti a na šetření kapacity kmitočtového spektra. Bez beamformingu by se signály vzájemně rušily a bylo by nemožné dosáhnout kýženého kvalitního spojení [9].

Beamforming umožňuje vytvořit paprsky signálu, které jsou přímo mířené na uživatele mobilní sítě (mezi kmitočty 3,4 GHz a 26 GHz). Mnoho antén generuje signály, které na sebe naráží a mohou se buď posílit nebo destruktivně vyrušit. Tedy posilují se směrem, kterým požadujeme a destruktivně se ruší ostatními směry. Tím nedochází zbytečně k šíření signálu do prostoru, ale dochází k šíření signálu jedním specifickým směrem. Dosáhne se tak vyšší kvality přenášeného signálu k účastníkovi, což zajišťuje rychlejší přenos a méně chyb [14].

Tato technologie úzce spolupracuje s mMIMO. Beamforming se při použití s mMIMO nazývá 3D Beamforming, které vytváří horizontální a vertikální paprsky směrem k uživatelům, čímž zvyšuje přenosové rychlosti pro uživatele, kteří

jsou například rozmístění v různých patrech budovy. Zpětná odezva z uživatelského zařízení umožňuje paprsku z antény najít jakýkoliv bod v prostoru. To znamená, že mobilnímu uživateli je vždy poskytnut intenzivní a směrově zaměřený paprsek, který zajišťuje spolehlivé spojení zařízení uživatele i například při pohybu na ulici nebo mezi různými patry v budově [15].

### 3.5.3 Network Slicing

Jelikož nároky různých zařízení jsou odlišné, jako například u mobilních telefonů je důležitější přenosová rychlost, zatímco pro autonomní vozidla je důležitější co nejkratší zpoždění při přenosu, tak v mobilních sítích 5G je využíván Network Slicing. Ten podporuje poskytování služeb přizpůsobených konkrétním typům zákazníků. Jedná se o členění sítě na více vrstev, které jsou od sebe odděleny. Tyto vytvořené podsítě mohou disponovat odlišnými parametry a sloužit pro příslušné zařízení, kterým dané parametry více vyhovují.

Poskytovatelům mobilní sítě 5G Network Slicing zprostředkovává vytvořit virtuální vrstvy, což umožňuje nabízet zákazníkovi vrstvy dle jeho potřeb. Každá virtuální vrstva nemusí mít přesně stejné funkce jako ostatní a tím je daná síť využívána efektivněji. Například jedna vrstva ze sítě je optimalizována pouze pro aplikace vyžadující vysokou přenosovou rychlost, další vrstva je optimalizována pro nízké zpoždění a třetí vrstva je optimalizována pro obrovský počet zařízení IoT. V závislosti na této optimalizaci nemusí být některé ze základních funkcí 5G k dispozici vůbec. Například pokud daná vrstva obsluhuje pouze zařízení IoT, tak není potřeba hlasová funkce [11].

### 3.5.4 Mobile Edge Computing

Mobile Edge Computing je významná a nezbytná technologie pro mobilní síť 5G. Umožňuje poskytovatelům mobilní sítě přenést výpočetní kapacitu z mobilních zařízení na „hranu“ mobilní sítě, tedy na server, který je součástí základnové stanice. Přínosy této technologie spočívají ve snížení zpoždění při přenosu, v umožnění úspory ve využití šířky pásma i úspory ve výkonu serveru, ve zrychlení procesů a v zajištění analýzy dat na „hraně“ sítě, což zaručí rychlou dostupnost k aktuálnějším výsledkům [16].

Pro zařízení vyžadující nízké zpoždění je přenos dat z centrálního cloudu až moc zdlouhavý proces. Například některé IoT zařízení vyžadují velmi rychlou odezvu od aplikačního serveru. Pracují s daty v reálném čase a potřebují, aby byl výpočetní výkon co nejbližší místu, kde se data generují [16].

Rozdíl mezi Cloud Computingem a Mobile Edge Computingem je takový, že v Mobile Edge Computingu jsou výpočetní síly rozděleny do více koncových zařízení a mezi serverem a uživatelem probíhá jen nejnútnejší komunikace. Zbytek, jako je sběr či ukládání dat, probíhá v místech sítě bližších koncovému uživateli, zatímco v Cloud Computingu pracují všechny procesy na jednom centrálním cloudu [16].

Příkladem může být budova vybavena kamerovým systémem. Jednotlivé kamery odesílají celý záznam ke zpracování do cloudu, což je příklad Cloud Computingu. Pokud by kamerový systém pracoval na bázi Mobile Edge Computingu, tak by každá kamera byla vybavena specifitějším hardwarem, který by vyhod-

nocoval, co je nutné do hlavního cloudu poslat, například na základě detekování pohybu v záběru. Tento přístup je výhodnější, protože server v distribuované síti, na kterém běží všechny procesy jednotlivých softwarů, má na starosti menší zlomek práce, jelikož výpočetní kapacita je přenesena na „hranu“ mobilní sítě [16].

## 3.6 5G FWA

5G FWA (Fixed Wireless Access) tvoří bezdrátové sítě poskytující širokopásmové propojení typu point-to-multipoint přes mobilní sítě v pevném bodě. Na rozdíl od Wi-Fi má větší dosah a umožňuje připojit více uživatelů. Využívá se v přístupových částí sítí, kde technologie 5G FWA je propojena s optickou částí přípojné nebo páteřní sítě. Tato technologie může doplňovat či nahrazovat pevné přístupové technologie. Poskytovatelům internetového připojení přináší alternativní řešení pro poskytnutí vysokorychlostního širokopásmového internetového připojení. Neekonomičtějšího uplatnění nabývají 5G FWA především v těžko přístupných oblastech a v oblastech s řídkým osídlením, kde se nevyplatí budovat kabelové rozvody [9].

Koncové zařízení u zákazníka CPE (Customer Premises Equipment) se mohou umísťovat vně nebo uvnitř budovy pro spojení se základnovou stanicí, ale preferovaná varianta je umístění na vnějšku budovy, protože penetrace milimetrovými vlnami běžnými stavebními materiály je nízká. Jako velmi efektivní se jeví pronajímání CPE jak pro zákazníky, tak i pro operátory z ekonomického hlediska. Tím, že bude CPE pouze pronajaté, usnadní operátorům případnou výměnu zařízení CPE za lepší, což je snazší pro případné vylepšení poskytovaných služeb od operátora, které bude zákazník eventuálně využívat [10].

5G FWA je konkurenceschopné přípojkám FTTx, protože náklady jsou téměř dvojnásobně nižší než u FTTx. Dále pro operátory s malou nebo žádnou pevnou kabelovou vybudovanou síťovou infrastrukturou vytváří 5G FWA možnost na poměrně snadné rozšíření jejich nabídky (viz obrázek 3.4), která konkuruje operátorům s již vybudovanou pevnou kabelovou infrastrukturou [10].

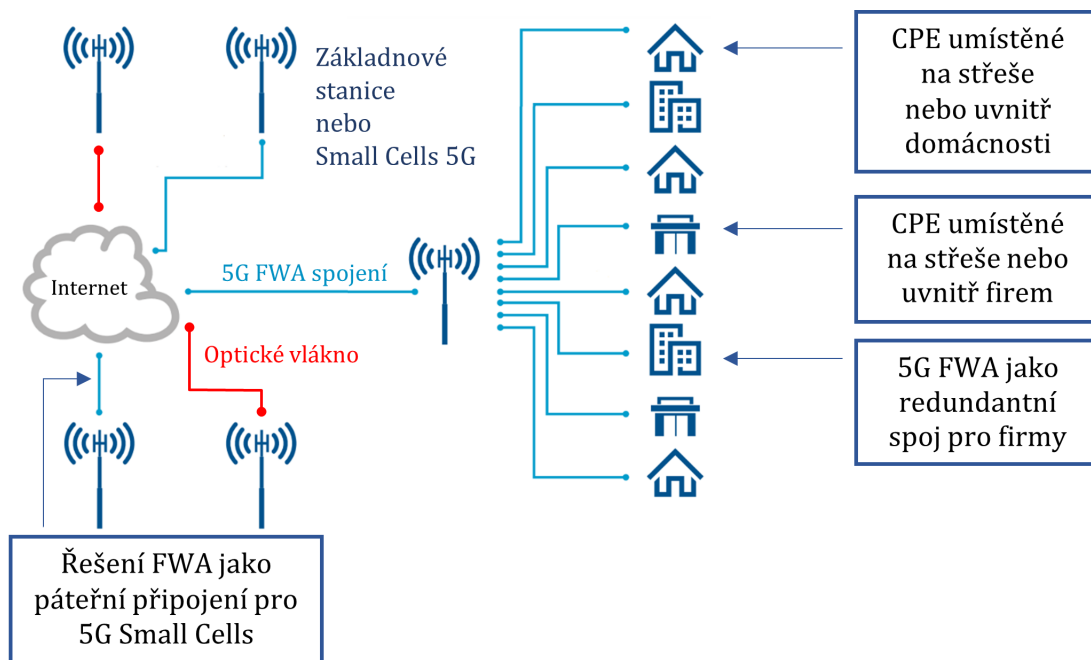
Podnikům, které stále zvyšují svoji závislost na internetovém připojení, roste potřeba na vytvoření redundantních spojů, kdyby náhodou došlo k výpadku určitých spojů od poskytovatele internetového připojení a zvýšit tak spolehlivost svých sítí. 5G FWA se jeví jako technologie vhodná na tvorbu redundantních spojů. Dále díky vlastnostem 5G FWA je možnost poskytnout do domácností over-the-top videa. To znamená, že poskytovatelé internetového připojení mohou poskytovat služby „triple play“ zahrnující přístup k vysokorychlostnímu Internetu, hlasovým službám i k televizním programům. Další velká příležitost pro 5G FWA je v rozvíjejících se zemích, kde pevné širokopásmové připojení dnes nepřevládá [17].

Kmitočtová pásma, která byla alokovaná pro technologii WiMAX se uvolňují pro mobilní sítě 4G a 5G. Přístupy jako je Wi-Fi, WiMAX nebo 4G FWA nedisponují vlastnosti pro budoucí zvyšující se nároky a očekává se jejich nahrazení právě 5G FWA, které disponuje například technologiemi mMIMO, beamforming či Network Slicing [13].

Ze tří primárních kmitočtových pásem 5G jsou pro 5G FWA nejvhodnější pásma mid-band (typicky 3,4 až 3,8 GHz) a high-band (typicky 24 až 27 GHz). V pásmu mid-band se jedná o rychlé a levné dodání alternativy kabelového při-



pojení. Poskytuje vynikající pokrytí a střední propustnost, což je vhodné pro příměstské nebo venkovské oblasti s nízkou hustotou osídlení. Rozsah kmitočtového pásma high-band je vhodný pro předměstské lokality a města s vyšší hustotou osídlení. Využity jsou milimetrové vlny umožňující gigabitové rychlosti a úroveň kapacity pásma je srovnatelná s optickými kabely [17].



Obrázek 3.4: Přehled nabídek produktů 5G FWA [10].

### 3.7 Požadavky na mobilní síť 5G

Standards pro mobilní síť 5G musí počítat s požadavky, které budou dostačující pro následujících 10 let. Tyto standardy pro mobilní síť 5G jsou publikovány organizací 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Vývoj standardu ovlivňuje skupina mobilních operátorů, výzkumných ústavů, výrobců a prodejců z ITU a aliancí NGMN (Next generation Mobile Network). Ti stanoví dané požadavky a příležitosti pro využití [14].

ITU vydala seznam požadavků IMT-2020 (International Mobile Telecommunications-2020) na mobilní síť 5G. Seznam požadavků IMT-2020 obsahuje parametry, jako jsou špičkové přenosové rychlosti, minimální přenosové rychlosti, zpoždění při přenosu, mobilita, hustota připojení a hustota provozu (viz tabulka 3.2).

**Tabulka 3.2:** Požadavky na mobilní síť 5G [14].

| Parametr   | IMT-2020                        | Oblast využití |
|--|---------------------------------|----------------|
| Špičková přenosová rychlost ve vzestupném směru                            | 10 Gbit/s                       | eMBB           |
| Špičková přenosová rychlost v sestupném směru                              | 20 Gbit/s                       | eMBB           |
| Zpoždění při přenosu   | 1 ms                            | eMBB           |
|  | 4 ms                            | URLLC          |
| Mobilita   | 500 km/h                        | eMBB, URLLC    |
| Hustota připojení  | $10^6$ zařízení/km <sup>2</sup> | mMTC           |
| Hustota provozu  | 10 Mbit/s na 1 m <sup>2</sup>   | eMBB           |
| Minimální přenosové rychlosti ve vnitřních prostorech ve vzestupném směru  | 0,5 Gbit/s                      | eMBB           |
| Minimální přenosové rychlosti ve vnitřních prostorech v sestupném směru    | 1 Gbit/s                        | eMBB           |
| Minimální přenosové rychlosti v hustě osídlené oblasti ve vzestupném směru | 150 Mbit/s                      | eMBB           |
| Minimální přenosové rychlosti v hustě osídlené oblasti v sestupném směru   | 300 Mbit/s                      | eMBB           |
| Minimální přenosové rychlosti po celém území ve vzestupném směru           | 25 Mbit/s                       | eMBB           |
| Minimální přenosové rychlosti po celém území v sestupném směru             | 50 Mbit/s                       | eMBB           |

## 4. Analýza sítí 5G v ČR

Stejně jako ve světě je i v České republice zavedení mobilních sítí 5G rozděleno na dvě fáze NSA (Non-Standalone) a SA (Standalone). NSA je etapa, kdy 5G koexistuje s 4G a v etapě SA jsou mobilní sítě 5G zcela nezávislé na mobilních sítích 4G. Aktuálně (2022) se Česká republika nachází v první fázi NSA, ve které je síť českými operátory pomalu rozšiřována po celé republice. Nasazení druhé fáze SA je stále daleká budoucnost. Existují 5G SA kampusové sítě na českých vysokých školách, které slouží například pro testování digitalizované výroby.

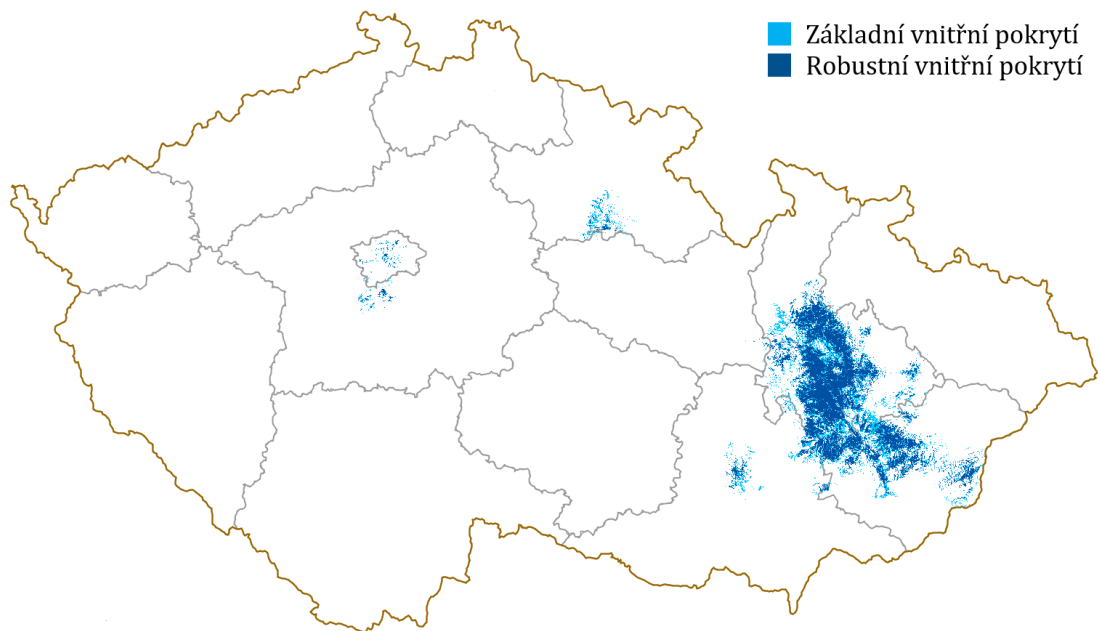
Rozvoj mobilních sítí 5G v České republice je vymezen strategickým dokumentem *Implementace a rozvoj sítí 5G v České republice* [9] a také výsledkem aukce kmitočtových pásem na konci roku 2020, která proběhla ohledně pásem 700 MHz a 3400 až 3600 MHz. Kmitočtová pásma si mezi sebe rozdělili společnosti O2, T-Mobile, Vodafone, Nortic Telecom a CentroNet (viz tabulka 4.1). Ještě není dokončen proces pro přidělení kmitočtů v pásmu 26 GHz, což je zásadní pro to, aby bylo dosaženo výrazného navýšení přenosových rychlostí.

**Tabulka 4.1:** Výsledky aukce kmitočtových pásem [18].

| Vítěz aukce                  | Přidělené úseky kmitočtů v pásmu 700 MHz | Přidělené úseky kmitočtů v pásmu 3,5 GHz |
|------------------------------|--|--|
| CentroNet, a.s               | -  | 3400–3480 MHz                            |
| Nordic Telecom 5G a.s.       | -  | 3580–3600 MHz                            |
| O2 Czech Republic a.s        | 703–713 / 758–768 MHz                    | 3540–3560 MHz                            |
| T-Mobile Czech Republic a.s. | 713–723 / 768–778 MHz                    | 3480–3540 MHz                            |
| Vodafone Czech Republic a.s. | 723–733 / 778–788 MHz                    | 3560–3580 MHz                            |

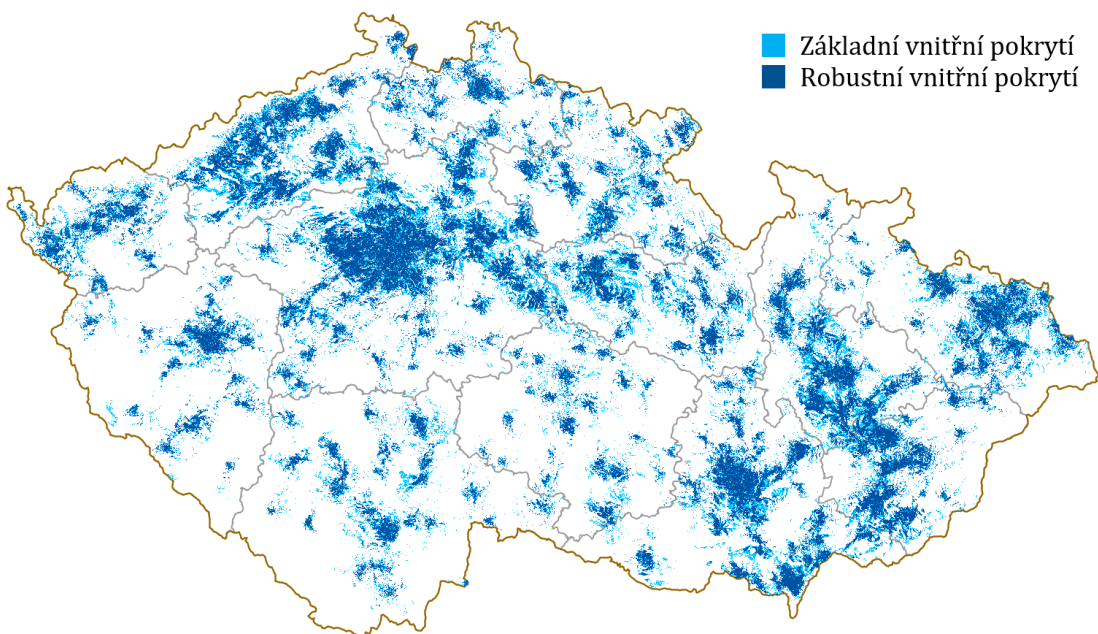
### 4.1 Stav pokrytí a poskytovaných služeb

Aktuálně (2022) na území České republiky není pokrytí signálem 5G příliš rozsáhlé. Téměř všechny stanice a přilehlé tunely pražského metra jsou již pokryty. Jako první komerční provoz mobilních sítí 5G spustil operátor O2 v roce 2020 [19]. Do konce června 2021 byly dostupné téměř v 60 městech. K pokrytí území tento operátor zatím využívá kmitočtová pásma 1800 MHz a 2100 MHz (viz obrázek 4.1 ze dne 1. 4. 2022). Rychlost v sestupném směru dosahuje až 700 Mbit/s a ve vzestupném směru až 100 Mbit/s. Operátor O2 poskytuje jako první možnost přístupu k Internetu pomocí 5G FWA zatím především v Praze, kde je možnost využívat přenosovou rychlost v sestupném směru až 50 Mbit/s a přenosovou rychlost v sestupném směru až 5 Mbit/s [20, 21].



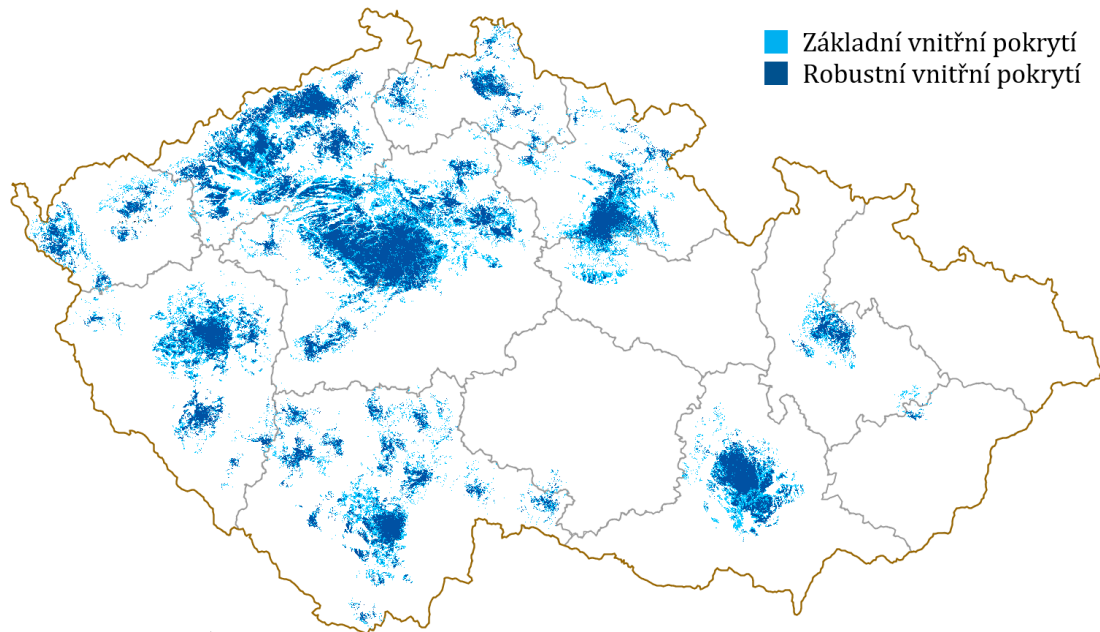
**Obrázek 4.1:** Mapa pokrytí pásmy 1800 MHz a 2100 MHz (O2) [29].

Tuzemským lídrem s nejrozsáhlejšími mobilními sítěmi 5G je operátor Vodafone, který pokrývá zhruba 50 % populace. Na začátku roku 2021 se síť skládala z více jak 700 vysílačů [22] a na konci roku 2021 bylo částečně signálem 5G pokryto 252 měst a stovky menších obcí [23]. K pokrytí území tento operátor zatím využívá kmitočtová pásma 1800 MHz a 2100 MHz (viz obrázek 4.2 ze dne 1. 4. 2022). Nejvyužívanější kmitočtové pásmo je 2100 MHz, přičemž přenosová rychlost v sestupném směru dosahuje až 330 Mbit/s a ve vzestupném směru až 75 Mbit/s [24].



**Obrázek 4.2:** Mapa pokrytí pásmy 1800 MHz a 2100 MHz (Vodafone) [29].

Operátor T-Mobile pokrýval na začátku roku 2022 přes 10 % populace, avšak cíl do konce roku 2022 je zajistit pokrytí více než 25 % populace. Na začátku roku 2022 bylo využíváno zhruba 600 vysílačů. K pokrytí území tento operátor zatím využívá kmitočtová pásma 700 MHz a 2100 MHz (viz obrázek 4.3 ze dne 1. 4. 2022). Zákazníci tohoto operátora mohou dosahovat přenosové rychlosti až 500 Mbit/s v sestupném směru a 80 Mbit/s ve vzestupném směru [25, 26].



**Obrázek 4.3:** Mapa pokrytí pásmy 700 MHz a 2100 MHz (T-Mobile) [29].

Virtuální operátor Nordic Telecom provozuje 5G FWA a orientuje se také na mobilní síť 5G pro Průmysl 4.0. Síť Nordic 5G, provozována v kmitočtovém pásmu 3700 MHz, je dostupná zhruba v 800 lokalitách s přenosovou rychlostí v sestupném směru až 100 Mbit/s a ve vzestupném směru 10 Mbit/s [27].

Společnost CetroNet, která byla jedním z vítězů aukce kmitočtových pásem pro 5G, byla koupena virtuálním operátorem Nej.cz, který působí v mobilní síti operátora T-Mobile. Nej.cz poskytuje televizní obsah a vysokorychlostní připojení k Internetu více než 165 tisícům domácností. Společnost uvádí, že díky získání kmitočtového pásma 3500 MHz mají možnost nabídnout kvalitnější připojení v oblastech pomocí mobilní sítě 5G, které nejsou pokryty optickou sítí a jsou odkázány na připojení k Internetu pomocí technologie Wi-Fi [28].

## 4.2 Cíle České republiky

Stanovené cíle pro implementaci mobilních sítí 5G v České republice [9, 30]:

- připojit 5G základnové stanice optickými sítěmi nebo jinými sítěmi s velmi vysokou kapacitou (mobilní backhaul),
- zpřístupnit kmitočtové pásmo 26 GHz,
- navazovat spolupráce s vlastníky nebo provozovateli budov, pouličních lamp a dopravní infrastruktury kvůli zavedení prvků mobilních sítí 5G,
- podporovat spolupráce mezi oblastí elektronických komunikací, oblastí uživatelského průmyslu i akademickou sférou a výzkumem,
- iniciovat vznik aktivit směřujících k realizaci projektů využívajících mobilní síť 5G ve městech a obcích s důrazem na zvyšování kvality života občanů,
- podporovat využití mobilních sítí 5G při rozvoji Průmyslu 4.0 společně s aplikacemi umělé inteligence,
- zajistit, aby poskytovatelé nabízeli IPv6, kvůli vyčerpání adresního prostoru IPv4 enormním počtem připojených zařízení,
- nepodceňovat kybernetickou bezpečnost budovaných mobilních sítí 5G na národní úrovni a také z hlediska mezinárodní situace,
- podporovat 20 vědeckých projektů, které souvisí s technologickým rozvojem mobilních sítí 5G, kde průměrná cena jednoho projektu bude přibližně 15 miliónů korun,
- zajistit nepřerušované mobilní datové komunikace pro rychle pohybující se vozy včetně nepřerušované mobilní datové komunikace v tunelech, tam je cílem pokrýt signálem 5G alespoň 210 km železničních koridorů:
  - Praha–Česká Třebová–Ostrava,
  - Praha–Ústí nad Labem,
  - Praha–Plzeň,
  - Praha–České Budějovice,
  - Česká Třebová–Brno,
- do 4. čtvrtletí 2025 vybavit alespoň 350 železničních vagonů opakovači pro signály 5G kvůli propustnosti elektromagnetických vln železničními vozy,
- do roku 2025 pokrýt 5G signálem všechny úseky železničních a silničních koridorů spadajících do evropské sítě TEN-T (Trans-European Transport Networks) a pokrýt 95 % území každého města nad 50 000 obyvatel,
- do roku 2027 pokrýt 5G signálem 70 % území každého okresu dle podmínek aukce kmitočtů pásma 700 MHz,
- do roku 2030 pokrýt 90 % území každého okresu podle podmínek aukce kmitočtů pásma 700 MHz.

## 5. Analýza datových přenosů

Počet uživatelů Internetu a objem přenesených dat dlouhodobě roste kvůli novým vyspělejším zařízením, službám a aplikacím. Digitalizace dosáhla ve společnosti takové pozice, že je již nemyslitelné, aby se její rozvoj zpomalil nebo dokonce zastavil, takže celosvětovým trendem je neustálý nárůst počtu aktivních uživatelů Internetu (viz tabulka 5.1).

Pandemie covid-19 urychlila tento trend a prověřila robustnost telekomunikačních sítí v souvislosti s okamžitým přechodem do online režimu, což se projevilo v nárůstu internetového provozu v České republice o 25 %, který byl hodnocen na úrovni hlavního propojovacího bodu [1], jelikož řada lidí vykonávala práci z domova, probíhala online výuka a zvýšila se konzumace digitální zábavy. V České republice bylo na začátku roku 2021 9,43 miliónů internetových uživatelů. Průměrná přenosová rychlost fixních přípojek v sestupném směru činila 74,79 Mbit/s a průměrná přenosová rychlost mobilního připojení v sestupném směru byla 61,83 Mbit/s [31].

Ačkoliv veřejné telekomunikační sítě vydržely nápor zákazníků a během pandemie nedošlo k jejich většímu výpadku, tak cílem České republiky je zaměřit se na oblasti, kde sítě VHCN neexistují nebo kde nejsou současné sítě z hlediska kapacity dostatečně robustní. To by šlo řešit prostřednictvím investováním do optických sítí či vylepšením stávajících pevných i mobilních sítí v daných oblastech [1].

**Tabulka 5.1:** Růst počtu uživatelů Internetu [32].

| Datum         | Počet uživatelů [mil.] | Podíl ze světové populace |
|---------------|------------------------|---------------------------|
| Leden 2018    | 4 208                  | 55,1 %                    |
| Prosinec 2018 | 4 313                  | 55,6 %                    |
| Březen 2019   | 4 383                  | 56,8 %                    |
| Červen 2019   | 4 536                  | 58,8 %                    |
| Červen 2020   | 4 833                  | 62,0 %                    |
| Prosinec 2020 | 5 053                  | 64,2 %                    |
| Březen 2021   | 5 168                  | 65,6 %                    |

## 5.1 Uživatelé a internetové služby

Požadavky na datové přenosy jsou dány typem uživatelů, segmentem trhu a internetovými službami, které využívají. Ve studii *Beyond fast: how the speed of residential internet access will develop between now and 2022* rozdělili uživatele na 4 skupiny [33]:

- **opozdilí uživatelé** – zdráhají se osvojit nové technologie a služby, používají je pouze pokud musí,
- **běžní uživatelé** – největší skupina,
- **inovátoři** – rychle si osvojí nové služby a používají většinu nabízených možností,
- **nároční uživatelé** – neobvykle rychle si osvojí nové služby a používají je nadprůměrně.

V následujících podkapitolách jsou popsány využívané internetové služby běžnými uživateli. Tyto internetové služby mají společné některé běžné aktivity, které se prolínají. Například do multimediálních internetových služeb spadá aktivita sledování videí, avšak ve vzdělávacích službách i na sociálních sítích jsou také provozována videa ve vysokém rozlišení. Mezi běžné aktivity na Internetu patří:

- posílání a čtení emailů,
- využívání webového prohlížeče pro vyhledání informací nebo pro navštívení webových stránek,
- sledování videí,
- využívání sociálních sítí,
- videokonference,
- hraní online her,
- poslouchání hudby,
- nákupy a prodej zboží či jiných služeb,
- stahování a nahrávání videí, obrázků, her, hudby a různých souborů,
- využívání online bankovníctví,
- využívání cloudových služeb.



### 5.1.1 Multimediální služby

Multimediální služby sloužící k přenosu videa a zvuku ve vysoké kvalitě přinášejí nejvyšší nároky na celkovou propustnost, odezvu a nízkou ztrátovost paketů přístupových sítí. Dnes video služby představují největší podíl internetového provozu a očekává se, že rapidně porostou kvůli přehrávání videí ve vyšším rozlišení jako je 4K a 8K. Mezi video služby se řadí například IPTV, YouTube, Netflix, Amazon Prime nebo Twitch a do audio služeb patří například Spotify nebo Apple Music.

IPTV se vysílá multicastem či unicastem. Multicast je živý přenos video obsahu pro účastníka, který se připojuje k živému vysílání. Video obsah u tohoto typu přenosu je vysílán pro všechny uživatele sítě jen jednou. Pokud uživatel přehrávání video obsahu na svém zařízení pozastaví nebo vrátí zpět, tak se již bude přenášet pomocí unicastu, protože video obsah pro daného uživatele je unikátní a musí být samostatně poslán od zdroje k uživateli přes celou síť operátora [5].

Jeden přenos přes IPTV službu v rozlišení SD vyžaduje minimálně 2 Mbit/s, v rozlišení HD přibližně 5 Mbit/s a v UHD 15 Mbit/s díky moderním formátům kódování videa. Pro příjemný uživatelský zážitek je doporučená přípojka s přenosovou rychlostí v sestupném směru 100 Mbit/s. To umožní sledovat videa v rozlišení UHD na více zařízeních a současně mít k dispozici dostatečnou kapacitu domácí přípojky pro další služby elektronických komunikací [5].

Nejpopulárnější platforma na sledování videí je aktuálně (2022) YouTube. Doporučená minimální rychlost pro sledování YouTube videí pro SD 360p je 0,7 Mbit/s, SD 480p je 1,1 Mbit/s, HD 720p je 2,5 Mbit/s, HD 1080p je 5 Mbit/s, 4K je 20 Mbit/s a 8K je 50 Mbit/s [34]. S každým dalším uživatelem sledujícím YouTube video ve stejné síti se rychlost násobí. Například pokud by současně běžela čtyři YouTube videa v rozlišení 4K ve stejné síti, tak doporučená minimální rychlost je 80 Mbit/s, aby se video přehrávalo plynule a zážitek nebyl frustrující [5].

### 5.1.2 Online hry

U online her je nejdůležitější stabilita a rychlost odezvy připojení. Na rozdíl od video služeb hraní online her nevyužívá masivní objemy přenesených dat, pokud se daný hráč nerozhodne danou hru streamovat online na platformách, jako je například Twitch nebo YouTube. Obsah nelze stáhnout dopředu, protože vše probíhá v reálném čase a pokud dojde ke ztrátě dat, tak hra nebude běžet plynule a hraní bude frustrující.

Nejnáročnější hry na přenosovou rychlost se pohybují okolo 6 Mbit/s [5]. Enormní objemy dat spotřebuje stahování her z platform jako je například Steam, Uplay nebo PlayStation Store. V dnešní době mají typické hry velikosti v intervalu od 10 GB až do 100 GB. Stáhnutí je sice jednorázové, ale většina vývojářů her vydává v určitých intervalech aktualizace o velikosti 1 až 10 GB, bez kterých by nešlo dále hru hrát. Momentálně (2022) je nejobemnější hrou na trhu Call of Duty: Modern Warfare. Jedná se přibližně o velikost 250 GB a vydané aktualizace velikostně dosahují až 10 GB [35].

Jak stahování samotné hry, tak i stahování aktualizací musí být pro uživatele s pomalejším připojením nepříjemné, takže vysokokapacitní připojení u takto

častého a objemného stahování je velmi žádoucí. Pro představu, hra veliká 50 GB se při přenosové rychlosti 10 Mbit/s stáhne přibližně za 10 hodin [5].

Na trhu již řadu let existuje myšlenka cloud gaming. Vybraná hra není přímo spuštěná na hráčově přístroji, ale je pouze streamovaný obraz z vysokovýkonného serveru. Hráči tak nebudou muset vlastnit výkonný drahý hardware či pravidelně investovat do hráčského vybavení, ale mohou si pronajmout server a hrát na méně výkonném zařízení, které je připojeno k Internetu. To tedy znamená, že stačí mít pouze stabilní rychlé internetové připojení a předplatné, se kterým jsou hry na monitor nebo televizi streamovány ve formě obrazu. Dále cloud gaming odstraní potřebu stahovat velké objemy dat [5].

Hlavní překážkou cloud gamingu je kvalita připojení uživatelů, protože cloud gaming vyžaduje vysokorychlostní připojení, stabilitu a nízké zpoždění. Tuto překážku například řeší 5G svými vlastnostmi, takže herní zážitek je, jako by hra byla přímo spuštěna na zařízení u uživatele. Předpokládaná rychlost připojení pro cloud gaming je pro 720p 10 Mbit/s, pro 1080p 20 Mbit/s a pro 4K 30 Mbit/s [36].

### 5.1.3 Vzdělávací služby

Internet ve vzdělávání občanů má mnoho forem využití a digitální vzdělávání přináší nové metody výuky. Především se jedná o cloudové služby, vyhledávání informací v internetových vyhledávacích a přehrávání videí. Pandemie covid-19 způsobila přechod na distanční výuku, čímž výrazně prověřila robustnost telekomunikačních sítí. Výuka studentů byla především přesunuta na platformy jako Moodle, Microsoft Teams, Zoom, YouTube či Google Meet. Z hlediska domácího vzdělávání jsou kladeny nároky na kapacitu sítě kvůli přehrávání videí, videohovorům či testování znalostí online formou zaškrtávání správných odpovědí nebo odesláním naskenovaných papírů s odpověďmi.

Online vyučovací hodiny se uskutečňují pomocí videohovorů, které se řadí mezi nejnáročnější internetové aktivity vzhledem k datovým tokům v sestupném i v zestupném směru. Některým studentům jsou také poskytována natočená videa, typicky na platformě YouTube. U těchto vzdělávacích videí se dá předpokládat, že budou mít určitý standard kvality, ale je zatím nepravděpodobné publikování videí od vyučujících ve 4K nebo 8K rozlišení. Zvýšení poptávky po vysokorychlostním připojení by v budoucnu mohlo zvýšit zapojení virtuální reality do online výuky [5].

Cloudové služby mají významné postavení ve vzdělání. Pro studenty je výhodné mít přístup k souborům z jakéhokoliv zařízení, které disponuje internetovým připojením anebo například je možnost skupinové spolupráce na jednom dokumentu zároveň [5].

Nedílnou součástí vzdělávacích služeb jsou online knihovny, které ukládají obsah knih do elektronické podoby. U rozsáhlých knih s mnoha obrázky se může jednat o objemnější soubory. Déle je internetové připojení využíváno pro školní informační systém, který zajišťuje například elektronické žákovské knížky nebo elektronické omluvenky. Návštěva těchto portálů nepatří mezi služby, které vyžadují vysokou přenosovou rychlost nebo nízké zpoždění [5].

### 5.1.4 Cloudové služby

Cloudové služby zprostředkovávají internetová úložiště dat, ke kterým má uživatel přístup z jakéhokoliv zařízení, které je připojeno k Internetu. Mezi cloudové služby patří například Google Disk, Dropbox, SharePoint nebo iCloud. Využívání cloudových služeb je nedílnou součástí různých firem nebo veřejných institucí a poptávka po těchto službách neustále roste. Výhodou cloudových služeb spočívají v přístupu k datům odkudkoliv i kdykoliv a ve snížení provozních nákladů, protože není potřeba investovat do infrastruktury informační technologie, jelikož stačí si pouze pronajmout cloudové úložiště [5].

Cloudové služby mají i využití pro domácnosti. Zařízení jako jsou domácí spotřebiče, auta a další elektronická zařízení používají cloudové služby jako prostředek pro komunikaci a ukládají mnoho dat. Vzhledem k integraci IoT do každodenního života občanů jsou cloudové služby pro domácnosti významnou součástí [5].

Kvůli nárůstu používání cloudových služeb dojde ke zvýšení nároků na datový tok jak v sestupném, tak i ve vzestupném směru, a tím se zvýší poptávka po vysokokapacitním připojení u firem, veřejných institucí nebo domácností, které budou za pomoci cloudu nahrávat a stahovat masy dat [5].

### 5.1.5 Internet věcí

Internet věcí je koncepce sítě skládající se ze senzorů a aktuátorů, která se snaží z dat vytěžit úplné maximum. Data se měří, ukládají, sdílejí a zpracovávají. Fyzická zařízení těchto sítí jsou připojena k Internetu a navzájem komunikují. Získaná data jsou důležitá pro další vývoj a zvýšení efektivity fungování těchto zařízení. Využívají se i přístupná data třetích stran. Například při zalévání zahrady je efektivnější vědět, zda nebude v blízké době pršet než pouze informace ze senzoru, že půda je již suchá. Tuto informaci zařízení získá třeba ze serveru hydrometeorologického ústavu.

Internet věcí má především využití v sektorech jako jsou chytrá města, Průmysl 4.0, zemědělství a také v domácnostech. V budoucnu se očekává masivní nárůst IoT zařízení. Zátěž na datovou síť je individuální, jelikož záleží na počtu připojených zařízení a na typu dat, které zařízení posílá. Nejvíce datové sítě zatěžují přístroje závislé na video přenosech jako jsou třeba kamerové systémy, u kterých je zátěž sítě závislá na kvalitě záznamu a počtu kamer. U služby, jako je online kamerový systém je nutnost vysokých přenosových rychlostí jak ve směru sestupném, tak i vzestupném [5].

### 5.1.6 Elektronické obchody, emaily, zpravodajství a sociální sítě

Online nakupování během pandemie covid-19 začalo využívat mnohem více lidí napříč všemi věkovými skupinami, než tomu bylo doposud. Dále se mezi nejvíce využívané internetové služby řadí emaily, zpravodajství a sociální sítě. U této kategorie služeb záleží na typu obsahu, který může být pouze textový, obrázkový nebo ve formě videa a také hraje roli podoba i počet reklam na dané platformě.

Obsah internetových stránek má různé objemy dat, a proto potřebná rychlost připojení pro rychlé načítání je individuální. Nejobjemnější stránky obsahují mnoho videí a obrázků ve vysokém rozlišení. Drtivá většina stránek má objem nižší než 5 MB. Za předpokladu, že uživatel má k dispozici rychlost 10 Mbit/s, tak se obsah stránky s velikostí 5 MB stáhne přibližně za 4 sekundy. Zde nemá mírné zpoždění stahování takového obsahu velký vliv na uživatelský prožitek a vysokorychlostní připojení pro online nakupování, čtení emailů či zpravodajství není nezbytné. Provozovatelé stránek si běžně pronajímají vzdálené servery, na kterých je obsah stránek nahrán. Vysoká přenosová rychlost je pro nahrávání dat na server výhodou, avšak není ve většině případů nutností [5].

V budoucnu můžeme očekávat zvyšující se kvalitu grafického zpracování elektronických obchodů a dalších internetových stránek, což bude vytvářet nové potřeby pro přenosovou rychlost. Stránek s objemem 10 MB je v dnešní době velmi málo, ale dá se předpokládat, že v budoucnu bude tento objem typický. Pro načtení stránek s objemem 10 MB za jednu sekundu je potřeba přenosová rychlost nejméně 80 Mbit/s [5].

Sociální sítě jako je například Facebook, WhatsApp, Instagram, TikTok, Twitter nebo Snapchat mají vysoké nároky na přenosovou rychlost kvůli velkému množství obrázků a videí ve vysokém rozlišení. Specifická nezbytná přenosová rychlost se liší na základě obsahu dané stránky i na individuálním obsahu uživatele. Vesměs se však dá predikovat, že potřebná přenosová rychlost je srovnatelná s video službami [5].

## 5.2 Prognózy požadavků na datové přenosy

Růst internetového provozu a zvyšující se nároky na datové sítě jsou bezesporu. Největší podíl na internetovém provozu mají video služby. Hlavním důvodem je sledování video služeb ve vyšším rozlišení a případné navyšování rozlišení. V roce 2019 společnost Cisco ve své zprávě *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022* [37] uvedla predikci, že video služby v roce 2022 budou představovat 82 % z celého internetového provozu. V roce 2017 video představovalo 75 % internetového provozu.

V publikaci *Regulatory, in particular access, regimes for network investment models in Europe* [38] je vypracovaná prognóza ohledně nárůstu datových toků do roku 2025 v rámci Evropské unie. Internetový provoz v Evropské unii by se mohl mezi lety 2014 a 2025 zvýšit více než sedmkrát, z toho podíl video služeb by se mohl zvýšit z celkového internetového provozu 53 % pro rok 2014 na 68 % pro rok 2025. Nejvyšší podíl na internetovém provozu od uživatele tvoří cloudové služby, kde by internetový provoz měl vzrůst z 16 % pro rok 2014 na 20 % pro

rok 2025. Prognóza stanovuje v období 2014–2025 vzrůst provozu v sestupném směru v Evropě pro jedno připojení z 50 GB/měsíc na 298 GB/měsíc.

V diplomové práci *Prognóza požadavků na datové přenosy gigabitové společnosti* [39] je vyhotoven odhad nárůstu datových toků domácích přípojek do budoucna (výhled 2020 až 2025). Prognóza je založena na tom, že video bude přehráváno ve 4K rozlišení a na častějších přenosech pro cloudové služby. Odhady z diplomové práce pro rok 2025 ve směru sestupném jsou v tabulce 5.2 a pro směr vzestupný v tabulce 5.3.

**Tabulka 5.2:** Nárůst přenosové rychlosti v sestupném směru (2025) [39].

| Počet účastníků                  | 2     |       | 3     |        | 4     |        |
|----------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Rok                              | 2020  | 2025  | 2020  | 2025   | 2020  | 2025   |
| Běžně dostupná rychlost [Mbit/s] | 29,67 | 45,29 | 35,27 | 53,96  | 39,31 | 60,25  |
| Maximální rychlost [Mbit/s]      | 59,33 | 90,57 | 70,55 | 107,92 | 78,63 | 120,50 |
| Minimální rychlost [Mbit/s]      | 5,49  | 12,28 | 6,44  | 14,56  | 7,08  | 16,17  |

**Tabulka 5.3:** Nárůst přenosové rychlosti ve vzestupném směru (2025) [39].

| Počet účastníků                  | 2     |       | 3     |       | 4     |       |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Rok                              | 2020  | 2025  | 2020  | 2025  | 2020  | 2025  |
| Běžně dostupná rychlost [Mbit/s] | 5,02  | 7,04  | 5,943 | 8,32  | 6,56  | 9,17  |
| Maximální rychlost [Mbit/s]      | 10,05 | 14,09 | 11,89 | 16,63 | 13,12 | 18,34 |

## 5.3 Využití kapacity internetové přípojky běžným uživatelem

Mezi cíli politických a národních plánů je pochopitelně proklamování stále vyšších přenosových rychlostí (definice přenosových rychlostí dle ČTÚ obsahuje podkapitola 6.5). Dalším mezníkem je přenosová rychlost blížící se k 1 Gbit/s. Tento stanovený mezník a neustálé propagování navyšování přenosových rychlostí pro domácí přípojky vyvolává otázky:

- Není tento mezník zbytečně vysoký?
- Je nutné stále propagovat navyšování přenosové rychlosti pro domácí přípojky?
- Jaký je pro běžného uživatele limit přenosové rychlosti, kterou již nevyužije?

Z prognóz vyplývá, že nejnáročnější na přenosovou kapacitu jsou služby video streamingu, video na vyžádání a IPTV kvůli zvyšování kvality rozlišení. Nicméně je nutné také počítat s tím, že jsou neustále zlepšované kompresní metody, které jsou implementovány jak v nejnovějších standardech u terestriální televize, tak i ve streamingových platformách. To znamená, že díky efektivnějším kompresním metodám zde není takový razantní nárůst přenosových rychlostí, jak by se dalo očekávat. Dále je nutné vzít v potaz, zda lidé budou běžně na svých zařízeních využívat vysoká rozlišení jako je například 4K nebo 8K. Rozlišení 1K se jeví jako dostatečné pro mobilní zařízení a pro osobní počítače. Pro jeden video stream v rozlišení 1K je typicky potřebná přenosová rychlost 5 až 10 Mbit/s.

Každý uživatel narazí na bod, kdy už zvyšování jeho kapacity internetové přípojky nebude mít smysl. Pro politiky a operátory nebude jednoduché propagovat neustále navyšování přenosové rychlosti pro domácí přípojky a s velkou pravděpodobností skončí s touto propagací. Například mezník 1 Gbit/s má obrovskou rezervu a pro běžného uživatele i vícečlenné domácnosti je nemožné tuto rezervu vyplnit. Naopak je vhodný pro školy nebo firmy.

Pro jednoho běžného uživatele se jeví jako dostačující limit s rezervou tarif od operátorů, který nabízí běžně dostupnou přenosovou rychlost 50 Mbit/s v sestupném směru, což pokryje i případný video stream v rozlišení 4K, a běžně dostupnou přenosovou rychlost 5 Mbit/s ve vztupném směru. Požadavky na celkovou kapacitu domácí přípojky se liší mezi jedním člověkem a vícečlennou domácností. Bylo by tedy vhodné nabízené tarify od operátorů situovat podle počtu osob v domácnosti.

## 6. Metody měření

Metody měření datového připojení se dělí dle vrstev komunikačního modelu TCP/IP a dle toho, zda se provádí za provozu (in service) nebo bez provozu (out-of service) [40]:

- **Aplikační vrstva** – měřiče rychlosti na webových stránkách
- **Transportní vrstva** – protokoly TCP/UDP
  - TCP (RFC 6349)
  - UDP (FlowPing)
- **Síťová vrstva** – protokol IP
  - in service: IP Ping, Trace Route
  - out-of service: Iperf (TCP/UDP)
- **Spojivá vrstva** – Ethernet
  - in service: monitorování dle ITU-T Y.1731
  - out-of service: test RFC 2544, speciální doplnění pro kolísání zpoždění a pro více současných toků
  - out-of service: metoda SAM (Service Activation Methodology) dle ITU-T Y.1564
- **Fyzická vrstva** – různá dle konkrétní technologie
  - in service: monitorování blokové chybovosti dle ITU-T G.826
  - out-of service: BERT (Bit Error Rate Test) pomocí PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) dle ITU-T G.821

### 6.1 Měřicí nástroj NetTest

Nástroj NetTest, který je provozován ČTÚ, je měřič na webové stránce pro ověření kvality služby přístupu k Internetu. Výsledkem je skutečně dosažitelná přenosová rychlost ve směru sestupném i vzestupném a doba odezvy. Uživatel má možnost spustit jedno měření nebo proces certifikovaného měření pro účely reklamace služby přístupu k Internetu v pevném místě. Pro relevantní výsledek je nutné zajistit následující body [41]:

- Test je nutné provádět na uživatelském zařízení (například desktop PC nebo notebook) s aktualizovaným operačním systémem i webovým prohlížečem.
- Uživatelské zařízení musí být vždy připojeno k uživatelskému ethernetovému rozhraní (porty RJ-45) koncového zařízení pevným způsobem pomocí metalického kabelu (minimálně Category 5e) nebo případně optickým kabelem.

- Pro měření rychlostí vyšších než 100 Mbit/s se doporučuje operační systém, který využívá algoritmus TCP Cubic (Windows 10 a vyšší, MacOS X Yosemite a vyšší, Linux kernel 2.6.19 a vyšší), jelikož výkon uživatelského zařízení i operační systém má zásadní vliv na naměřené hodnoty.
- Nástroj NetTest pro certifikované měření lze použít do inzerovaných hodnot menších nebo rovno hodnotám 500 Mbit/s pro směr sestupný a 250 Mbit/s pro směr vzestupný.
- Během celého procesu měření se nesmí používat na uživatelském zařízení jiné aplikace a také po celou dobu měření se nesmí využívat služba přístupu k Internetu na jiných zařízeních.

## 6.2 Měření pomocí protokolu TCP

Využití protokolu TCP (Transmission Control Protocol) dle dokumentu RFC 6349 na transportní vrstvě je vhodné využít pro měření, jelikož TCP protokol využívá drtivá většina uživatelských aplikací, a proto jsou výsledky testů blízké koncovému uživateli. Dále je využíváno vlastností TCP protokolu s potvrzováním doručení dat, který reguluje datový tok na základně stavu sítě [40].

Přenosová rychlost na transportní vrstvě je nižší oproti nižším vrstvám modelu TCP/IP kvůli přidanému záhlaví a také kvůli regulačním mechanismům protokolu TCP mezi které patří náběh, opakování paketů a velikost okna. Výsledky měřících zařízení, které využívá TCP protokol, mohou být zkresleny právě kvůli jeho složitým mechanismům.

Získat objektivnější pohled na vlastnosti přípojky je možné správným nastavením velikost okna. Pokud by nastavení nebylo správné, tak by se mohl přenos pozastavovat a tím se nenaměří reálně využitelná kapacita přípojky. Problém lze obejít spuštěním více paralelních TCP toků čímž se kapacity přípojky vyplní a poté se sumarizují dílčí datové přenosové rychlosti [40].

### 6.2.1 Stanovení velikosti TCP okna

Velikost TCP okna je objem dat, který je vyslán bez toho, aniž by bylo doručeno potvrzení od protější strany. Objem přenášených dat není omezen zpožděním, ale velikostí okna. Čím je doba zpoždění vyšší, tím větší velikost okna je nutné zvolit, aby byla využita plná kapacita pro přenos dat. Výpočet velikosti okna lze pomocí vzorce

$$RWND \geq \frac{BDP}{8}, \quad (6.1)$$

kde RWND (Receive Window) představuje velikosti TCP okna na přijímací straně v bajtech a BDP (Bandwidth Delay Product) je násobek kapacity datového spoje a zpoždění mezi oběma konci spoje vyjádřeno v bitech. BDP lze spočítat pomocí vzorce

$$BDP = RTT \cdot BB, \quad (6.2)$$

kde RTT (Round Trip Time) je uplynulá doba mezi odesláním prvního bitu segmentu TCP a příjmem posledního bitu odpovídajícího potvrzení segmentu TCP



vyjádřen v sekundách a BB (Bottleneck Bandwidth) je nejnižší hodnota přenosové kapacity celé měřené trasy (tzv. úzké hrdlo) vyjádřená v bitech za sekundu. Nastavení velikosti TCP okna na zbytečně vysokou hodnotu může při nízkých hodnotách BB způsobit přetížení vyrovnávací paměti síťového prvku [42].

## 6.2.2 Stanovení počtu TCP toků

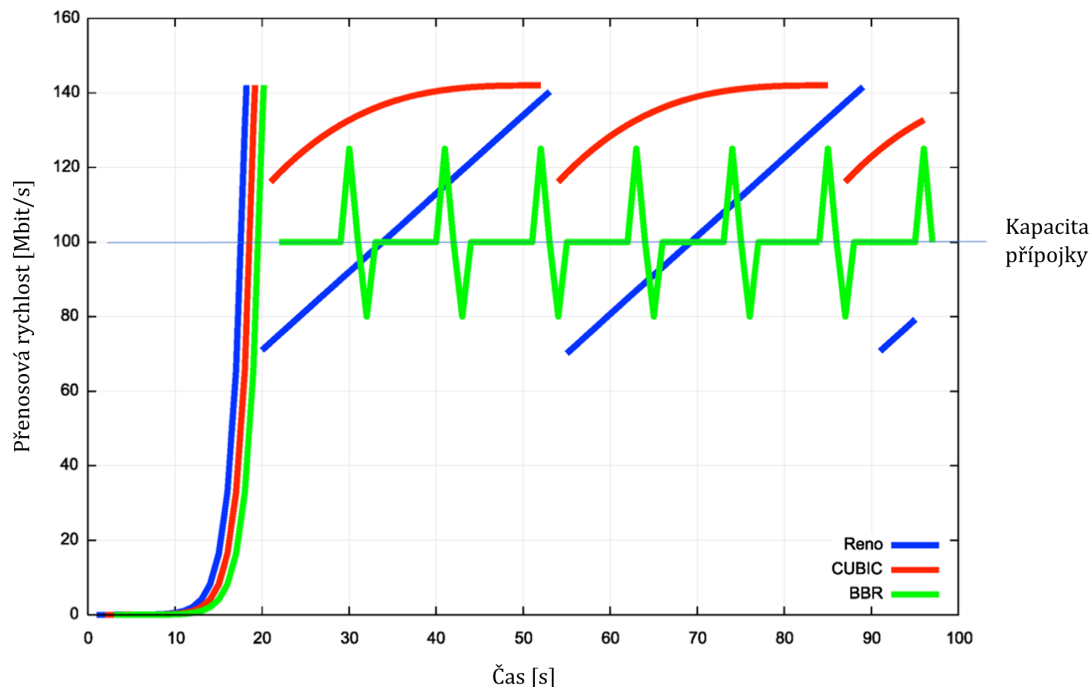
Důvodem využití více toků TCP je dosažení co nejvěrohodnějšího pokrytí celé kapacity přenosové trasy. Stanovit počet TCP toků lze pomocí vzorce

$$N \geq \frac{\text{BDP}}{8 \cdot \text{RWND}}, \quad (6.3)$$

kde  $N$  je počet TCP spojení (zaokrouhлено na nejbližší vyšší celé číslo). Obecně je doporučeno využívat při měření více TCP toků i pokud to není potřeba dle rovnice 6.3, jelikož může například docházet k přidělení jiné kapacity přenosové trasy [42].

## 6.2.3 Algoritmy pro zamezení zahlcení sítě

Zahlčení sítě negativně ovlivňuje kvalitu služeb a vede ke zpoždění, ztrátě paketů či k blokování nových spojení. Pro řešení tohoto problému jsou využívány tři algoritmy: *Cubic*, *Reno* a *BBR* (Bottleneck Bandwidth and Round-trip). Tyto algoritmy řeší zamezení zahlcení sítě odlišnými způsoby (viz obrázek 6.1).



Obrázek 6.1: Srovnání chování algoritmů Reno, Cubic a BBR [44].

Algoritmus *Reno* lineárně zvyšuje přenosovou rychlost až do zjištění ztráty paketů a poté sníží přenosovou rychlost na polovinu. Po obnovení ztracených paketů algoritmus začne zpátky lineárně navyšovat přenosovou rychlost. Ideálním modelem chování při zamezování zahlcení sítě je pilový vzor, kde se přenosová rychlost zvyšuje lineárně v čase [44].

Algoritmus *Cubic* nereaguje na ztrátu paketu velkým poklesem přenosové rychlosti. Po obnovení ztracených paketů přenosová rychlost roste přes kubickou funkci. To znamená, že rychleji obnoví přenosovou rychlost před ztrátou paketu. Tento algoritmus je vhodný pro sítě s velkým zpožděním [44].

Předchozí dva algoritmy zvyšovaly přenosovou rychlost, dokud nebyla zaznamenána ztráta paketů. Algoritmus *BBR* neupravuje přenosovou rychlost při ztrátě paketu. Místo toho sleduje šířku pásma, aby zjistil, do jaké míry se mění. Jakmile se šířka pásma přestane zvyšovat, algoritmus vyhodnotí, že našel efektivní šířku pásma připojení a může přestat narůstat. Přenosovou rychlost zvyšuje, pokud je naplněna vyrovnávací paměť. Poté snižuje přenosovou rychlost pod maximální kapacitu kanálu. Během snižování přenosové rychlosti je čas pro obnovení ztracených paketů. Tento algoritmus je vhodný pro sítě s vysokou přenosovou rychlostí a s nízkým zpožděním [44].

### 6.3 Měřicí nástroj FlowPing

FlowPing pracuje s protokolem UDP v režimu klient/server a umožňuje vytvářet zatěžovací testy s proměnnou velikostí generovaného provozu. To lze využít pro ověření minimální přenosové rychlosti nebo k testování real-time služeb, jako je například streaming videa. Nástroj umožňuje generovat rušivý provoz současně s daným streamem a lze zachytit vliv jednotlivých nastavených parametrů testu na kvalitu videa plus sledovat parametry jako je propustnost sítě nebo ztrátovost paketů [45].

### 6.4 Měřicí nástroj Iperf3

Iperf3 je založený na principu klient/server. Umožňuje měřit zpoždění a propustnost pomocí více paralelních spojení najednou. Mezi hlavní přednosti měřicího nástroje Iperf3 patří [45]:

- **TCP:**
  - měření propustnosti datového toku v jednom, druhém nebo obou směrech mezi měřicím zařízením a serverem,
  - nastavení velikosti MSS (Maximum Segment Size),
  - možnost změnit velikost TCP okna.
- **UDP:**
  - možnost vytvořit UDP tok s definovanou přenosovou rychlostí,
  - možnost měření ztrátovosti a zpoždění paketů.

## 6.5 Testované parametry sítí

Mezi hlavní testované parametry sítí se řadí:

- přenosová rychlost v sestupném směru (downstream),
- přenosová rychlost ve vzestupném směru (upstream),
- zpoždění ve smyčce (RTT – Round Trip Time),
- kolísání zpoždění,
- ztrátovost paketů (PLR – Packet Loss Rate).

Přenosová rychlost ve vzestupném směru udává objem informace, který se přeneše za jednotku času ve směru od koncového uživatele směrem k poskytovateli služby přístupu k Internetu a přenosová rychlost v sestupném směru je směr od poskytovatele služby přístupu k Internetu směrem ke koncovému uživateli. Zpoždění ve smyčce udává uplynulou dobu mezi odesláním prvního bitu segmentu TCP a příjmem posledního bitu, který odpovídá potvrzení segmentu TCP. Ztrátovost paketů procentuálně reprezentuje situaci, kdy odeslané pakety nedosáhnou svého cíle.

Povinnost všech poskytovatelů internetových služeb je uvádět ve smluvních podmínkách hodnoty přenosové rychlosti ve vzestupném a sestupném směru. Například pokud vzniknou velké trvající nebo velké pravidelně se opakující odchylky od udané běžné rychlosti, tak je možnost poskytované služby reklamovat. Definice přenosových rychlostí dle ČTÚ [43]:

- **Minimální přenosová rychlost**

*„Minimální rychlostí se rozumí nejnižší garantovaná rychlost stahování (tj. downloadu) a ukládání (tj. uploadu), kterou se příslušný poskytovatel služby přístupu k Internetu smluvně zavázal koncovému uživateli poskytnout. V případě, že rychlost klesne pod tuto hodnotu, znamená takový stav výpadek služby. To znamená, že rychlost stahování, resp. ukládání dat by neměla nikdy klesnout pod tuto hodnotu.“*

- **Maximální přenosová rychlost**

*„Maximální rychlostí se rozumí nejvyšší možná rychlost stahování a ukládání, kterou poskytovatel služby přístupu k Internetu uvedl ve smlouvě koncovému uživateli pro poskytování dané služby. Maximální rychlost musí být stanovena realisticky s ohledem na použitou technologii a její přenosové možnosti a s ohledem na konkrétní podmínky nasazení, které jsou pro rychlosti stahování a ukládání limitující. Maximální rychlost musí být na dané přípojce či v daném místě připojení reálně dosažitelná.“*

- **Běžně dostupná přenosová rychlost**

*„Běžně dostupnou rychlostí se rozumí taková rychlost, kterou může koncový uživatel předpokládat a reálně dosahovat při stahování a ukládání dat v době, kdy danou službu používá. Tato rychlost je definována jako podíl množství stažených či vložených dat a příslušného časového úseku, ve kterém je služba*

poskytována. Běžně dostupná rychlost může být specifikována různou hodnotou pro čas špičky i pro čas mimo špičku, avšak v takovém případě, musí být dané rychlosti běžně dosažitelné v daných časových úsecích (ve špičce, mimo špičku). Poskytovatel služby přístupu k Internetu musí též jasně uvést časové vymezení úseků ve špičce a mimo špičku, a to jasnými numerickými hodnotami.“

- **Inzerovaná přenosová rychlost**

„Inzerovaná rychlost je rychlost stahování a ukládání, kterou poskytovatel služby přístupu k Internetu používá ve svých obchodních sděleních, včetně reklamy a marketingu, v souvislosti s propagací, prodejem nebo dodáním dané služby. Inzerovaná rychlost, včetně další komerční komunikace, podléhá rovněž příslušným ustanovením spotřebitelského a soutěžního práva a nesmí být vyšších hodnot než ve smlouvě uvedené hodnoty maximálních rychlostí.“

## 6.6 Měřicí strany

Vymezení měřících stran a přenosové trasy dle ČTÚ [45]:

- **Měřicí zařízení** je měřicí strana se softwarem a měřicími nástroji, která zaznamenává naměřená data a uchovává je v paměti. Výpočetní a síťový výkon musí být dostatečně vysoký, aby negativně neovlivňoval měření.
- **Měřicí server** je měřicí strana připojená k Internetu, která slouží jako protistrana pro testy prováděné měřicím zařízením. Výpočetní výkon, velikost paměti a rychlost připojení k Internetu měřicího serveru musí být vysoké tak, aby žádným způsobem negativně neovlivňovaly měření.
- **Přenosová trasa** je posloupnost přenosových uzlů, kdy mezi každými dvěma po sobě jdoucími přenosovými uzly existuje spojení a zároveň prvním přenosovým uzlem je měřicí zařízení a posledním je měřicí server.

## 6.7 Průběh měření pevných sítí

Měření a vyhodnocování datových parametrů pevných sítí je podrobně specifikováno v dokumentu od ČTÚ: *Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů pevných sítí elektronických komunikací* [42]. Použité měřicí metody jsou v souladu s BEREC pokyny.

Pro měření pevných sítí je doporučeno provádět alespoň tři měření během dne s dostatečnou časovou diverzitou, což znamená měřit minimálně jednou v provozní špičce a minimálně jednou měřit mimo provozní špičku. Jedno měření by nemělo být delší než 30 minut, ve kterém proběhne sekvence tří testů. Doporučená podoba procesu měření TCP propustnosti se skládá z následujících kroků [42]:

1. testování vzestupné TCP propustnosti (upstream)  $\leq 300$  sekund,
2. pauza (uložení předcházejících výsledků testu)  $\leq 90$  sekund,
3. testování sestupné TCP propustnosti směru (downstream)  $\leq 300$  sekund,

4. pauza (uložení předcházejících výsledků testu)  $\leq 90$  sekund,
5. obousměrný test TCP propustnosti  $\leq 600$  sekund,
6. pauza (uložení předcházejících výsledků testu) do zahájení další sekvence měření  $\leq 90$  sekund.

Výstupem měření je zpráva obsahující minimálně údaje o termínu měření, místě měření, technologii, postupu, chronologii měření, nastavení testovacího zařízení, hodnoty průtoku TCP dat a nastavenou velikost TCP okna. Specifikace služby přístupu k Internetu v pevném místě dle ČTÚ jsou (účinnost od 1. ledna 2021):

- inzerovaná rychlost  $\leq$  maximální rychlost,
- běžně dostupná rychlost  $\geq 60$  % inzerované rychlosti,
- minimální rychlost  $\geq 30$  % inzerované rychlosti.

## 6.8 Průběh měření mobilních sítí

Měření a vyhodnocování datových parametrů mobilních sítí je podrobně specifikováno v dokumentu od ČTÚ: *Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací* [45], který je využíván v případě kontrolních měření pokrytí za jízdy nebo v případě stacionárních měření. Použité měřicí metody jsou v souladu s BEREC pokyny. Specifikace mobilní služby přístupu k Internetu dle ČTÚ je (účinnost od 1. ledna 2021):

- inzerovaná rychlost  $\leq$  odhadovaná maximální rychlost.

### 6.8.1 Měření za jízdy

Měření parametrů během jízdy je kontinuální. Naměřené parametry jsou rozděleny do měřicích intervalů (1 sekunda) a také do jednotlivých měřicích čtverců, které slouží jako jednotka pro vyhodnocení pokrytí území. Za měřicí čtverec je považován normalizovaný čtverec  $50 \times 50$  metrů nebo  $100 \times 100$  metrů, který obsahuje informace o tom, do jaké obce patří, kolik zahrnuje obyvatel v daném čtverci a také to, zda je obsahuje dálnice nebo železniční koridory [45].

Rychlost vozidla, které obsahuje měřicí zařízení, by měla dosahovat v obci maximálně 40 km/h, na dálnici 100 km/h a pro vlak není maximální rychlost omezena. Typicky je měření prováděno v pracovních dnech mezi 7. a 22. hodinou. Výstupem měření je zpráva obsahující minimálně údaje o termínu měření, místě měření, měřicím čtverci, technologii, postupu, chronologii měření, nastavení testovacího zařízení, hodnoty TCP toků a nastavenou velikost TCP okna. Měření za jízdy je využíváno pro měření pokrytí obcí, dálnic, železničních koridorů, kontroly plnění závazků v aukci, vytipování problémových míst a pro řešení stížností koncových zákazníků [45].

## 6.8.2 Stacionární měření

Stacionární měření se vyhodnocuje pro adresní místo. V tomto místě se měří po dobu minimálně 10 minut s opakováním v různých dobách přes den, typicky mezi 7. a 22. hodinou, aby měření bylo relevantní. Doporučeno je provést tři měření s dostatečným časovým odstupem a všechna získaná data za opakované měření se průměrují [45].

Výstupem měření je zpráva obsahující minimálně údaje o termínu měření, místě měření, technologii, postupu, chronologii měření, nastavení testovacího zařízení, hodnoty TCP toků a nastavenou velikost TCP okna. Stacionární měření se využívá pro řešení stížností koncových zákazníků, kontrolu plnění podmínek aukcí a pro dlouhodobé sledování určitého místa [45].

# 7. Měření sítí 5G NSA

Cílem měření je změřit parametry mobilních sítí 5G NSA operátora Vodafone ve vybraných místech pomocí měřicího zařízení F-Tester 5G. První podkapitola 7.1 definuje použité nástroje pro měření. Podkapitola 7.2 popisuje realizaci zkušebních testů, které měly za cíl určit vhodná místa a vhodné nastavení testů pro scénář měření. Následně podkapitola 7.3 vymezuje měření, podkapitola 7.4 obsahuje výsledky provedených praktických testů a podkapitola 7.5 zahrnuje vyhodnocení měření. Mezi měřené parametry sítě, které jsou popsány v kapitole 6.5, patří:

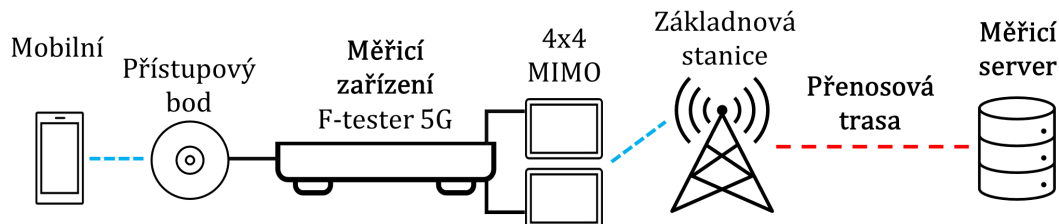
- přenosová rychlost v sestupném směru (downstream),
- přenosová rychlost ve vzestupném směru (upstream),
- zpoždění ve smyčce (RTT – Round Trip Time),
- ztrátovost paketů (PLR – Packet Loss Rate).

## 7.1 Použité nástroje pro měření

Pro měření parametrů mobilních sítí 5G NSA byly použity tyto nástroje:

- F-Tester 5G,
- SIM karta od operátora Vodafone s neomezenými daty,
- 4x4 MIMO antény,
- přístupový bod (TP-Link TL-WR802N),
- mobilní telefon.

Na obrázcích 7.1 a 7.2 je znázorněno propojení těchto nástrojů pro měření. Jako měřicí zařízení byl využit F-tester 5G, ve kterém je umístěna SIM karta. Jako měřicí server byl využit F-Tester Server, který se nachází na Karlově náměstí v budově ČVUT FEL na Karlově náměstí a je připojen pomocí infrastruktury CESNET. Mobilní telefon sloužil jako nástroj pro obsluhu F-Testeru, ke kterému se připojil pomocí přístupového bodu. Signály ze základnové stanice byly zachyceny pomocí 4x4 MIMO antén, které byly připojeny k F-Testeru.



**Obrázek 7.1:** Schéma zapojení měřicí sestavy.



Obrázek 7.2: Měřicí sestava.

### 7.1.1 F-Tester 5G

Měřicí zařízení F-Tester 5G (viz obrázky 7.3 a 7.4) bylo vyvinuto na katedře telekomunikační techniky, FEL, ČVUT v Praze. Spolu se standardním rozhraním Ethernet 1 Gbit/s je měřicí zařízení vybaveno bezdrátovými moduly pro měření mobilních sítí, které jsou založeny na rodině protokolu TCP/IP. Lze vytvořit měřicí scénáře, které se skládají z několika testů s libovolným datovým profilem.

Získané výsledky jsou vyhodnoceny korelovanými časovými průběhy odezvy komunikační sítě v podobě aktuální přenosové rychlosti, zpoždění a chybovosti. Výstupem měření jsou grafy a textové soubory se zaznamenanými parametry. Ukázky z webového rozhraní zobrazují obrázky A.1 a A.2. Testovací možnosti přizpůsobené pro mobilní sítě jsou [46]:

- Testy propustnosti pomocí **protokolu TCP** (Iperf3)
  - konfigurovatelné parametry včetně počtu souběžných toků,
  - konfigurovatelné posloupnosti testů,
  - volba algoritmů Reno, Cubic nebo BBR,
  - vyhodnocení přenosových rychlostí a zpoždění ve smyčce.
- Testy propustnosti pomocí **protokolu UDP** (Iperf3, FlowPing)
  - ověření minimální propustnosti a stability,
  - vyhodnocení zpoždění a ztrátovosti paketů.





Obrázek 7.3: Přední strana F-Testeru.



Obrázek 7.4: Zadní strana F-Testeru.

## 7.2 Realizace zkušebních testů

Zkušební testy měly za cíl určit vhodná místa pro měření a také vhodné nastavení testů pro scénář měření (velikost okna a počet TCP toků), aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Proběhly ve středu 13. 4. 2022 mezi 11. a 13. hodinou na osmi místech, která jsou zcela pokryta signálem 5G od operátora Vodafone na kmitočtu 1800 MHz:

1. uvnitř panelového domu za oknem (3. patro),
2. venku před oknem panelového domu (3. patro),
3. uprostřed bytu v panelovém domě (3. patro),
4. uvnitř panelového domu za oknem (10. patro),
5. uvnitř panelového domu za oknem (1. patro),
6. venku na novém sídlišti (A),
7. venku na novém sídlišti (B),
8. v parku.

Na obrázku 7.5 je mapa zobrazující pozici základnových stanic (modrá kolečka) a místa (červené hvězdičky), ve kterých byly měřeny parametry mobilních sítí 5G NSA. Obrázky 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 a 7.9 specifikují umístění měřicí sestavy.



Obrázek 7.5: Mapa zobrazující měřená místa a základnové stanice [47].



Obrázek 7.6: Panelový dům.



Obrázek 7.7: Nové sídliště A.

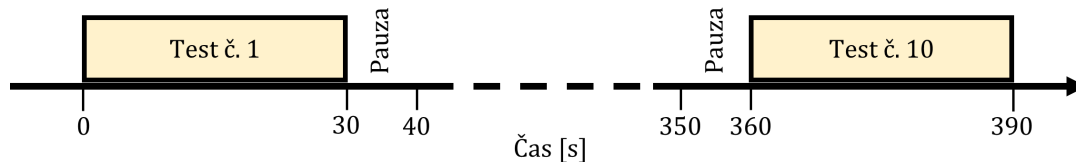


Obrázek 7.8: Nové sídliště B.



Obrázek 7.9: Park.

Na těchto místech byl spuštěn scénář obsahující deset různých testů (viz obrázek 7.10). Jeden test trval 30 sekund a scénář zahrnuje 10sekundové pauzy, aby se systém stačil stabilizovat. Nastavení jednotlivých testů obsahují tabulky 7.1 a 7.2. Algoritmus Cubic byl zvolen, jelikož je vhodný pro sítě s velkým zpožděním.



**Obrázek 7.10:** Grafické znázornění sekvence deseti testů v závislosti na čase.

**Tabulka 7.1:** Testy typu Iperf3 pro sestupný směr (downstream).

| Číslo testu             | 1     | 2     | 3     | 4     | 9    |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Typ testu               | TCP   | TCP   | TCP   | TCP   | UDP  |
| Počet toků              | 6     | 6     | 10    | 10    | 3    |
| Velikost okna [KB]      | 256   | 512   | 256   | 512   | -    |
| MMS [bytes]             | 1400  | 1400  | 1400  | 1400  | -    |
| TCP algoritmus          | Cubic | Cubic | Cubic | Cubic | -    |
| Bitrate [kbit/s]        | -     | -     | -     | -     | 5000 |
| Velikost paketu [bytes] | -     | -     | -     | -     | 1400 |

**Tabulka 7.2:** Testy typu Iperf3 pro vzestupný směr (upstream).

| Číslo testu             | 5     | 6     | 7     | 8     | 10   |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Typ testu               | TCP   | TCP   | TCP   | TCP   | UDP  |
| Počet toků              | 6     | 6     | 10    | 10    | 3    |
| Velikost okna [KB]      | 256   | 512   | 256   | 512   | -    |
| MMS [bytes]             | 1400  | 1400  | 1400  | 1400  | -    |
| TCP algoritmus          | Cubic | Cubic | Cubic | Cubic | -    |
| Bitrate [kbit/s]        | -     | -     | -     | -     | 2000 |
| Velikost paketu [bytes] | -     | -     | -     | -     | 1400 |

## 7.2.1 Výsledky zkušebních testů

Tato kapitola obsahuje tabulky s výsledky zkušebních testů, které odpovídají vybraným místům a číslu testu. Tabulka 7.3 zobrazuje naměřené průměrné rychlosti pro downstream, tabulka 7.5 naměřené průměrné rychlosti pro upstream, tabulka 7.4 naměřené průměrné RTT pro downstream a tabulka 7.6 naměřené průměrné RTT pro upstream. Soubory s výsledky zkušebních testů, které byly vygenerované z měřicího zařízení F-Tester, obsahuje příloha A.2.

**Tabulka 7.3:** Průměrné přenosové rychlosti pro downstream odpovídající místům a číslu testu v Mbit/s.

| Číslo testu                 | 1      | 2      | 3      | 4      |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Uvnitř za oknem (3. patro)  | 102,80 | 102,80 | 100,91 | 103,51 |
| Venku před oknem (3. patro) | 114,20 | 104,93 | 109,25 | 112,20 |
| Uprostřed bytu (3. patro)   | 93,99  | 97,98  | 85,97  | 89,10  |
| Uvnitř za oknem (10. patro) | 75,28  | 69,70  | 93,97  | 91,97  |
| Uvnitř za oknem (1. patro)  | 142,17 | 180,12 | 203,47 | 160,61 |
| Venku A                     | 127,57 | 111,20 | 120,26 | 111,21 |
| Venku B                     | 91,88  | 114,16 | 129,77 | 97,73  |
| Park                        | 73,67  | 67,71  | 69,70  | 84,88  |

**Tabulka 7.4:** Průměrné RTT pro downstream odpovídající místům a číslu testu v milisekundách.

| Číslo testu                 | 1   | 2   | 3   | 4   |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Uvnitř za oknem (3. patro)  | 119 | 225 | 196 | 373 |
| Venku před oknem (3. patro) | 105 | 214 | 183 | 334 |
| Uprostřed bytu (3. patro)   | 128 | 252 | 245 | 416 |
| Uvnitř za oknem (10. patro) | 160 | 354 | 216 | 381 |
| Uvnitř za oknem (1. patro)  | 86  | 80  | 89  | 67  |
| Venku A                     | 98  | 175 | 163 | 224 |
| Venku B                     | 131 | 175 | 138 | 248 |
| Park                        | 166 | 336 | 296 | 426 |

**Tabulka 7.5:** Průměrné přenosové rychlosti pro upstream odpovídající místům a číslu testu v Mbit/s.

| Číslo testu                 | 5      | 6      | 7      | 8      |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Uvnitř za oknem (3. patro)  | 21,42  | 30,98  | 32,26  | 30,26  |
| Venku před oknem (3. patro) | 72,89  | 71,35  | 73,77  | 73,59  |
| Uprostřed bytu (3. patro)   | 21,15  | 19,86  | 17,15  | 16,46  |
| Uvnitř za oknem (10. patro) | 47,89  | 38,25  | 41,38  | 35,12  |
| Uvnitř za oknem (1. patro)  | 52,84  | 56,72  | 53,10  | 50,88  |
| Venku A                     | 113,01 | 119,62 | 117,36 | 125,18 |
| Venku B                     | 98,05  | 95,23  | 95,94  | 97,73  |
| Park                        | 73,67  | 67,71  | 69,70  | 89,69  |

**Tabulka 7.6:** Průměrné RTT pro upstream odpovídající místům a číslu testu v milisekundách.

| Číslo testu                 | 5   | 6   | 7   | 8   |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
| Uvnitř za oknem (3. patro)  | 147 | 150 | 147 | 158 |
| Venku před oknem (3. patro) | 78  | 82  | 81  | 80  |
| Uprostřed bytu (3. patro)   | 204 | 221 | 257 | 264 |
| Uvnitř za oknem (10. patro) | 96  | 114 | 116 | 128 |
| Uvnitř za oknem (1. patro)  | 92  | 85  | 92  | 97  |
| Venku A                     | 76  | 68  | 66  | 67  |
| Venku B                     | 70  | 62  | 68  | 64  |
| Park                        | 71  | 71  | 73  | 77  |

## 7.2.2 Vyhodnocení zkušebních testů

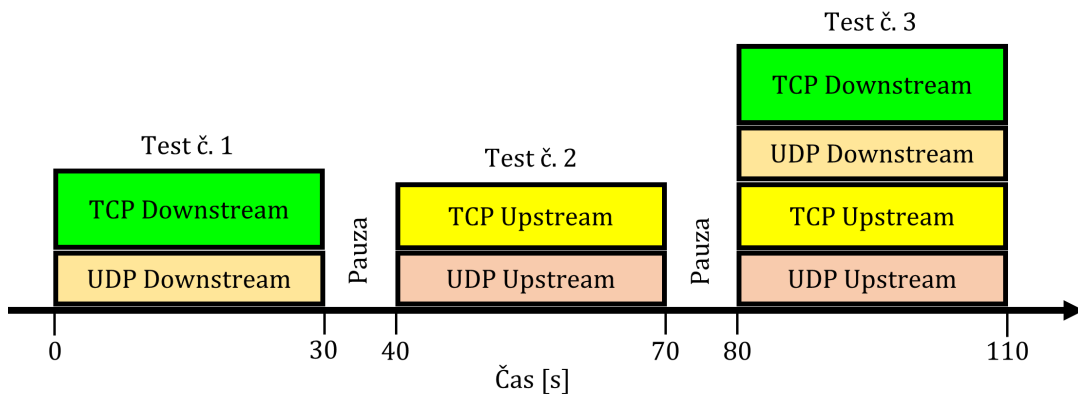
Parametry mobilních sítí, jako je přenosová rychlost v obou směrech (downstream a upstream), RTT a PLR, se mění velmi dynamicky v čase. Pro vyhodnocení vhodné volby velikosti okna a počtu TCP toků, které jsou popsány v podkapitole 6.2, byly využity nerovnice 6.1, 6.2 a 6.3. Do nich byly dosazeny řádové hodnoty dosahované při zkušebních testech, a to  $BB = 100$  Mbit/s a  $RTT = 200$  ms. Z nich vyplývalo, že je vhodné využívat 10 TCP toků a velikost okna 256 KB. Tato volba počtu TCP toků představovala rezervu kvůli velké dynamičnosti mobilních sítí. Velikost okna 256 KB dostala přednost před velikostí okna 512 KB, jelikož z výsledků vyplývalo, že hodnota 256 KB dosahovala podobných přenosových rychlostí jako 512 KB, tedy nezkreslovala výsledné hodnoty. Dále byl vzat v potaz i fakt, že zbytečně vysoká hodnota nastavení velikosti okna může vést k přetížení vyrovnávací paměti síťového prvku.

Na základně změřených hodnot ze zkušebních testů přenosové rychlosti se jako vhodná místa pro měření jevil panelový dům (uvnitř za oknem ve 3. a 1. patře) a park. Testování parametrů mobilních sítí uvnitř místnosti u okna simulovalo vhodné místo pro umístění zařízení CPE, které poskytuje připojení k Internetu pomocí 5G FWA. Park byl vybrán, protože zde nedocházelo k výrazným odrazům signálu.

## 7.3 Vymezení měření

Na základě vyhodnocení zkušebních testů v podkapitole 7.2.2 byl stanoven scénář a tři místa pro měření. Každý den proběhlo 5 měření od 8 hodin do 20 hodin v přibližných intervalech tří hodin, a to ve středu 20. 4. 2022, neděli 24. 4. 2022 a pondělí 25. 4. 2022. Scénář se skládal ze tří testů, kde jeden test trval 30 sekund, a mezi jednotlivými testy byla pauza 10 sekund pro stabilizaci systému (viz obrázek 7.11). Měření probíhalo na třech místech:

1. uvnitř panelového domu za oknem (3. patro),
2. uvnitř panelového domu za oknem (1. patro),
3. v parku.



Obrázek 7.11: Grafické znázornění sekvence tří testů v závislosti na čase.

Nastavení testů 1 a 2 zobrazuje tabulka 7.7. Test číslo 3 spojuje testy číslo 1 a 2. TCP tok měřil přenosovou rychlost a zpoždění ve smyčce. UDP tok byl spuštěn na pozadí všech testů s konstantní přenosovou rychlostí odpovídající minimální přenosové rychlosti pro validaci ztrátovosti paketů. Minimální přenosová rychlost pro downstream je 5 Mbit/s a pro upstream 2 Mbit/s.

**Tabulka 7.7:** Nastavení testů číslo 1 a 2.

| Číslo testu             | 1     | 1    | 2     | 2    |
|-------------------------|-------|------|-------|------|
| Typ testu               | TCP   | UDP  | TCP   | UDP  |
| Počet toků              | 10    | 1    | 10    | 1    |
| Velikost okna [KB]      | 256   | -    | 256   | -    |
| MMS [bytes]             | 1400  | -    | 1400  | -    |
| TCP algoritmus          | Cubic | -    | Cubic | -    |
| Bitrate [kbit/s]        | -     | 5000 | -     | 2000 |
| Velikost paketu [bytes] | -     | 1400 | -     | 1400 |

## 7.4 Výsledky měření

Tato kapitola obsahuje tabulky s výsledky měření parametrů mobilních sítí 5G NSA od operátora Vodafone a jejich zobrazení v grafech. Tabulky pro daný den zobrazují parametry, jako minimální, průměrnou, maximální přenosovou rychlost, průměrné RTT a průměrné PLR, pro vybraná místa v závislosti na vybraných časech. Každá tabulka se vztahuje k jednomu ze třech definovaných testů. Tabulky 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17, 7.18 a 7.19 se vztahují ke dni 20. 4. 2022 (středa), tabulky 7.20, 7.21, 7.22, 7.23, 7.24, 7.25, 7.26, 7.27, 7.28, 7.29, 7.30 a 7.31 ke dni 24. 4. 2022 (neděle) a tabulky 7.32, 7.33, 7.34, 7.35, 7.36, 7.37, 7.38, 7.39, 7.40, 7.41, 7.42 a 7.43 ke dni 25. 4. 2022 (pondělí). Soubory s výsledky zkušebních testů, které byly vygenerované z měřicího zařízení F-Tester, obsahuje příloha A.2.

Graficky jsou vykresleny naměřené průměrné přenosové rychlosti v závislosti na pěti vybraných časech a také pásy ohraničující hodnoty mezi minimální a maximální naměřenou přenosovou rychlostí v daných časech pro zobrazení rozptylu. Do grafů byly vybrány hodnoty z testů číslo 3 kvůli tomu, že tyto výsledky jsou relevantnější, jelikož při těchto testech byla síť více vytížena (testování obou směrů zároveň). Grafy na obrázcích 7.12 a 7.13 se vztahují ke dni 20. 4. 2022 (středa), grafy na obrázcích 7.14 a 7.15 se vztahují ke dni 24. 4. 2022 (neděle) a grafy na obrázcích 7.16 a 7.17 se vztahují ke dni 25. 4. 2022 (pondělí).



**Tabulka 7.8:** Výsledky testů číslo 1 pro 3. patro, 20. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 68,54  | 80,70  | 91,29  | 60,41  | 44,89  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 95,32  | 89,34  | 108,06 | 98,50  | 79,92  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 105,50 | 96,20  | 131,03 | 124,51 | 101,32 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 207,10 | 224,40 | 154,50 | 188,70 | 248,00 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,09   | 0,00   | 0,03   |

**Tabulka 7.9:** Výsledky testů číslo 2 pro 3. patro, 20. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 14,14  | 18,79  | 11,02  | 11,12  | 6,26   |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 16,64  | 23,60  | 16,41  | 14,63  | 30,56  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 21,89  | 31,26  | 23,48  | 18,32  | 42,26  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 245,60 | 188,80 | 247,10 | 275,40 | 194,20 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,06   |

**Tabulka 7.10:** Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 20. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 37,59  | 50,64  | 29,30  | 24,51  | 44,01  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 61,14  | 68,76  | 49,53  | 41,09  | 71,57  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 105,10 | 106,02 | 73,43  | 85,12  | 92,68  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 130,40 | 130,20 | 136,40 | 205,40 | 258,10 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,10   | 0,05   | 0,10   | 0,06   | 0,02   |

**Tabulka 7.11:** Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 20. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 12,50  | 15,89  | 11,00  | 3,13   | 20,35  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 18,17  | 23,13  | 15,60  | 12,34  | 31,79  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 26,60  | 31,31  | 21,89  | 18,30  | 41,03  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 259,00 | 231,20 | 225,00 | 367,60 | 342,40 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.12:** Výsledky testů číslo 1 pro 1. patro, 20. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 82,40  | 48,51  | 67,60  | 81,63  | 95,61  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 97,60  | 65,13  | 104,37 | 99,37  | 115,68 |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 109,89 | 84,71  | 116,78 | 120,96 | 130,89 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 173,70 | 303,40 | 161,80 | 205,80 | 167,10 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,02   | 0,00   | 0,02   | 0,00   | 0,02   |

**Tabulka 7.13:** Výsledky testů číslo 2 pro 1. patro, 20. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00 | 17:00 | 20:00 |
|---------------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 20,45  | 23,45  | 29,65 | 50,11 | 56,41 |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 25,20  | 28,85  | 60,50 | 59,55 | 62,68 |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 31,32  | 34,41  | 71,32 | 65,81 | 67,29 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 170,80 | 155,40 | 91,60 | 90,10 | 88,70 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,08  | 0,00  | 0,00  |

**Tabulka 7.14:** Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 20. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 61,63  | 35,20  | 89,74  | 92,40  | 65,71  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 83,29  | 61,20  | 104,30 | 107,93 | 89,82  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 116,02 | 84,91  | 117,01 | 117,69 | 109,98 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 114,90 | 334,20 | 190,80 | 179,70 | 223,70 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,10   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.15:** Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 20. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 21,95  | 17,25  | 45,40  | 57,91  | 31,31  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 26,23  | 27,69  | 56,68  | 67,76  | 59,26  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 31,31  | 37,82  | 67,94  | 79,21  | 77,19  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 204,70 | 423,10 | 235,60 | 215,60 | 269,00 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.16:** Výsledky testů číslo 1 pro park, 20. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 61,22  | 86,21  | 72,20  | 33,40  | 43,78  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 80,37  | 97,65  | 130,00 | 56,61  | 75,21  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 97,51  | 110,02 | 153,12 | 101,25 | 101,14 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 249,30 | 204,80 | 140,50 | 307,40 | 219,40 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,74   | 0,08   | 1,80   |

**Tabulka 7.17:** Výsledky testů číslo 2 pro park, 20. 4. 2022 (upstream).

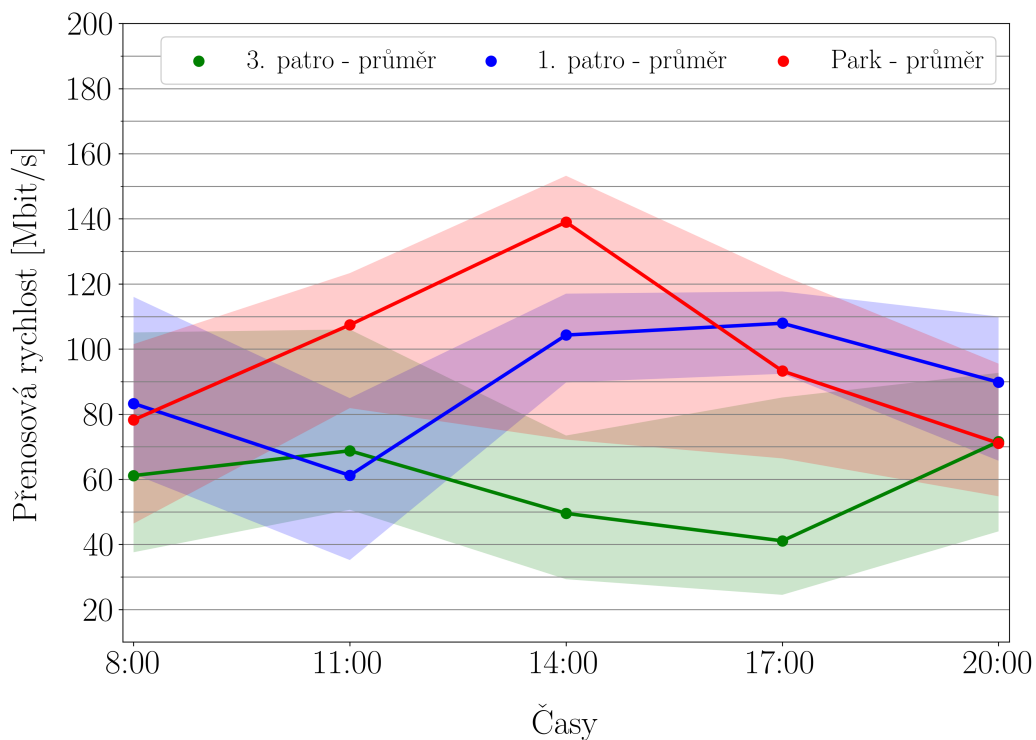
| Čas                                   | 8:00  | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00 |
|---------------------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 73,59 | 98,60  | 106,20 | 83,25  | 75,15 |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 82,42 | 104,48 | 115,32 | 98,69  | 84,49 |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 89,31 | 112,03 | 121,02 | 110,26 | 93,90 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 82,60 | 71,90  | 67,00  | 72,90  | 71,50 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00  | 0,00   | 0,00   | 0,02   | 0,00  |

**Tabulka 7.18:** Výsledky testů číslo 3 pro park, 20. 4. 2022 (downstream).

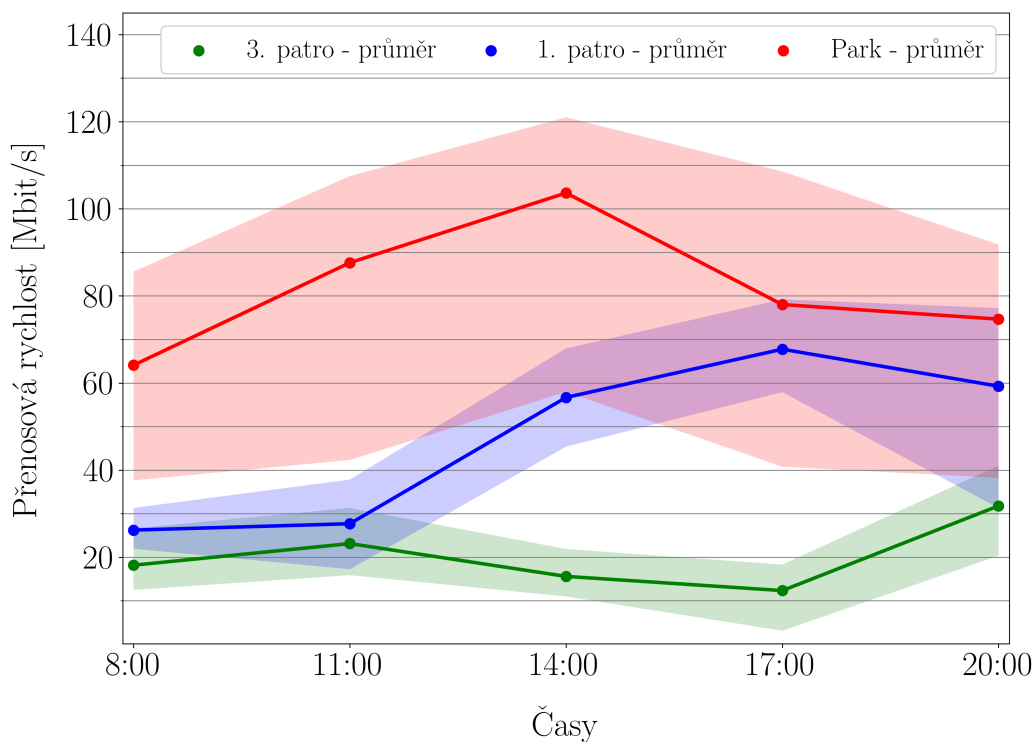
| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 46,41  | 81,87  | 72,20  | 66,42  | 54,78  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 78,24  | 107,42 | 139,00 | 93,27  | 71,08  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 101,50 | 123,32 | 153,22 | 122,68 | 95,51  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 270,70 | 185,00 | 150,10 | 205,10 | 120,20 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,32   | 1,32   | 0,17   | 1,57   |

**Tabulka 7.19:** Výsledky testů číslo 3 pro park, 20. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 37,65  | 42,31  | 57,98  | 40,78  | 38,21  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 64,10  | 87,61  | 103,63 | 78,01  | 74,66  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 85,59  | 107,50 | 121,00 | 108,56 | 91,78  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 285,10 | 200,10 | 122,50 | 185,40 | 139,80 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |



**Obrázek 7.12:** Graf průměrné přenosové rychlosti, 20. 4. 2022 (downstream).



**Obrázek 7.13:** Graf průměrné přenosové rychlosti, 20. 4. 2022 (upstream).

**Tabulka 7.20:** Výsledky testů číslo 1 pro 3. patro, 24. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 91,32  | 50,49  | 53,12  | 58,95  | 27,31  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 114,96 | 79,89  | 75,96  | 82,70  | 55,02  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 127,86 | 101,23 | 101,98 | 97,12  | 76,71  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 172,20 | 249,50 | 100,30 | 239,40 | 364,90 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,01   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.21:** Výsledky testů číslo 2 pro 3. patro, 24. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00 | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 39,21  | 32,89  | 51,68 | 36,02  | 4,70   |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 48,59  | 39,93  | 58,32 | 41,83  | 15,84  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 54,81  | 46,97  | 64,21 | 48,51  | 21,91  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 107,60 | 122,40 | 93,20 | 117,00 | 256,20 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00  | 0,00   | 0,04   |

**Tabulka 7.22:** Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 24. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 73,21  | 55,36  | 80,96  | 72,31  | 30,84  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 106,72 | 76,15  | 95,26  | 85,42  | 50,68  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 125,89 | 95,41  | 104,65 | 104,24 | 83,91  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 143,00 | 259,20 | 119,40 | 219,00 | 168,50 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,01   | 0,02   | 0,01   | 0,08   |

**Tabulka 7.23:** Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 24. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 37,56  | 15,70  | 49,21  | 33,50  | 12,50  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 47,43  | 38,69  | 58,67  | 41,88  | 17,38  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 61,12  | 50,31  | 67,02  | 49,29  | 23,51  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 200,20 | 317,40 | 133,80 | 288,30 | 291,90 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,02   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.24:** Výsledky testů číslo 1 pro 1. patro, 24. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 77,80  | 136,12 | 89,60  | 77,90  | 77,18  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 107,87 | 161,83 | 118,56 | 107,34 | 102,08 |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 140,02 | 172,21 | 138,02 | 136,10 | 127,02 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 196,80 | 127,60 | 160,50 | 183,90 | 64,50  |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,01   | 0,00   | 0,33   |

**Tabulka 7.25:** Výsledky testů číslo 2 pro 1. patro, 24. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00  | 11:00  | 14:00 | 17:00 | 20:00 |
|---------------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 62,60 | 80,91  | 54,80 | 57,90 | 57,89 |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 72,45 | 89,69  | 69,06 | 74,09 | 68,18 |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 78,32 | 105,12 | 86,11 | 92,41 | 76,65 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 86,50 | 69,50  | 85,90 | 81,30 | 85,30 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00  | 0,00   | 0,02  | 0,00  | 0,00  |

**Tabulka 7.26:** Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 24. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 75,61  | 132,21 | 63,74  | 70,41  | 81,89  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 108,16 | 156,06 | 110,21 | 107,53 | 104,51 |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 133,32 | 175,50 | 133,45 | 124,23 | 130,05 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 172,50 | 83,00  | 137,10 | 161,40 | 83,10  |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,01   | 0,05   | 0,02   | 0,12   | 0,09   |

**Tabulka 7.27:** Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 24. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 40,70  | 53,20  | 42,30  | 26,60  | 59,46  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 67,66  | 86,58  | 75,34  | 67,56  | 70,28  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 87,21  | 101,01 | 86,10  | 88,89  | 81,79  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 208,60 | 116,30 | 164,00 | 185,60 | 119,00 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,02   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.28:** Výsledky testů číslo 1 pro park, 24. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 83,40  | 53,62  | 89,41  | 50,51  | 44,50  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 128,82 | 86,33  | 129,29 | 102,90 | 77,24  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 161,11 | 142,55 | 157,87 | 157,52 | 128,96 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 142,90 | 247,70 | 194,10 | 194,50 | 249,90 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,55   | 0,14   | 0,12   | 0,65   | 0,18   |



**Tabulka 7.29:** Výsledky testů číslo 2 pro park, 24. 4. 2022 (upstream).

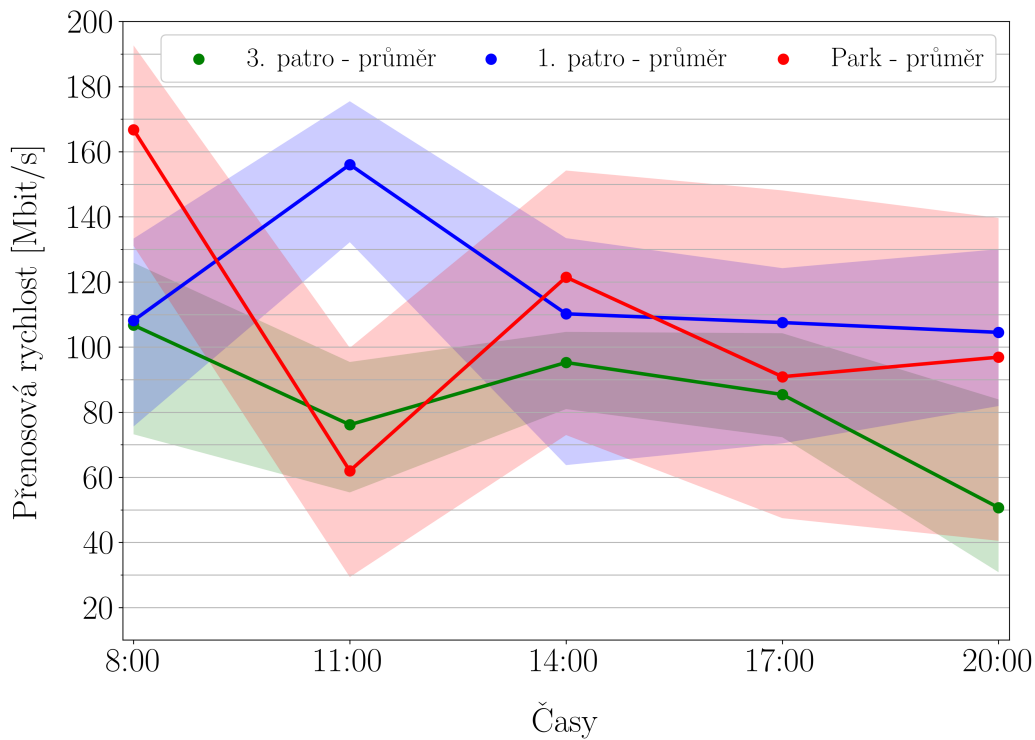
| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 93,21  | 88,32  | 98,65  | 71,69  | 87,70  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 103,07 | 109,53 | 116,64 | 105,86 | 102,29 |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 118,67 | 123,11 | 126,88 | 117,65 | 117,06 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 63,00  | 65,90  | 58,00  | 64,50  | 62,70  |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,04   | 0,00   |

**Tabulka 7.30:** Výsledky testů číslo 3 pro park, 24. 4. 2022 (downstream).

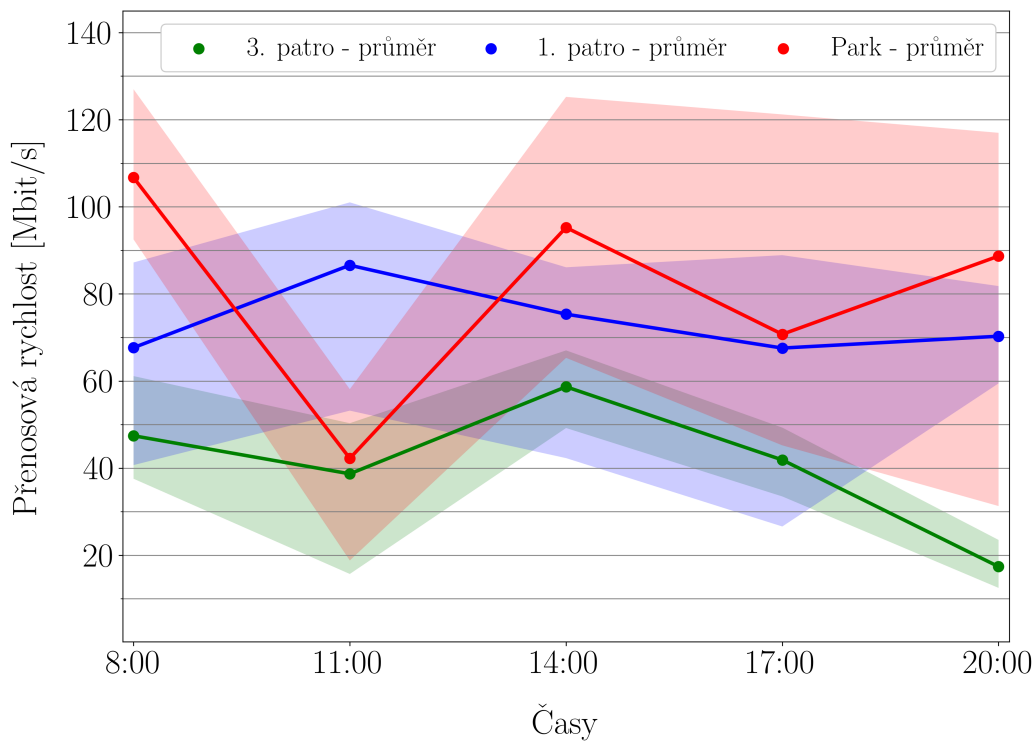
| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 131,11 | 29,36  | 72,98  | 47,45  | 40,49  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 166,75 | 61,97  | 121,47 | 90,90  | 96,90  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 192,65 | 99,75  | 154,22 | 148,12 | 139,65 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 126,70 | 286,50 | 152,20 | 194,50 | 163,30 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,10   | 0,27   | 0,52   | 0,03   | 0,45   |

**Tabulka 7.31:** Výsledky testů číslo 3 pro park, 24. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 92,51  | 18,81  | 65,32  | 45,23  | 31,29  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 106,71 | 42,24  | 95,24  | 70,73  | 88,68  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 126,98 | 58,12  | 125,23 | 121,20 | 116,98 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 150,40 | 324,10 | 177,70 | 253,80 | 168,50 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,70   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |



**Obrázek 7.14:** Graf průměrné přenosové rychlosti, 24. 4. 2022 (downstream).



**Obrázek 7.15:** Graf průměrné přenosové rychlosti, 24. 4. 2022 (upstream).

**Tabulka 7.32:** Výsledky testů číslo 1 pro 3. patro, 25. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 32,60  | 64,62  | 38,69  | 35,32  | 57,49  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 70,42  | 82,36  | 72,80  | 66,63  | 82,75  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 95,80  | 104,3  | 102,98 | 89,65  | 98,35  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 251,40 | 245,60 | 288,80 | 302,50 | 231,90 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,01   | 1,28   | 0,00   | 0,00   | 0,09   |

**Tabulka 7.33:** Výsledky testů číslo 2 pro 3. patro, 25. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 14,89  | 23,50  | 28,20  | 23,50  | 31,30  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 21,05  | 29,13  | 32,71  | 26,95  | 35,90  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 25,12  | 34,42  | 39,10  | 31,32  | 43,79  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 200,10 | 151,50 | 143,20 | 163,30 | 115,80 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.34:** Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 25. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 41,19  | 71,00  | 62,84  | 45,89  | 58,71  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 55,38  | 79,17  | 85,66  | 67,23  | 81,21  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 73,81  | 90,20  | 108,69 | 89,74  | 105,23 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 181,20 | 236,20 | 177,10 | 175,30 | 149,80 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,08   | 0,02   | 0,04   | 0,05   | 0,07   |

**Tabulka 7.35:** Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 25. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 14,12  | 20,40  | 23,52  | 15,69  | 21,90  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 18,09  | 27,78  | 32,17  | 24,59  | 30,21  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 23,50  | 34,42  | 39,15  | 31,30  | 39,12  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 297,90 | 332,30 | 258,70 | 277,80 | 139,30 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.36:** Výsledky testů číslo 1 pro 1. patro, 25. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 63,35  | 105,01 | 36,49  | 23,10  | 62,12  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 108,96 | 130,45 | 76,54  | 71,84  | 94,88  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 136,12 | 151,21 | 99,89  | 114,20 | 118,59 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 143,90 | 136,70 | 256,30 | 259,10 | 145,20 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,05   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,02   |

**Tabulka 7.37:** Výsledky testů číslo 2 pro 1. patro, 25. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00  | 11:00 | 14:00  | 17:00 | 20:00 |
|---------------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 50,12 | 54,80 | 43,79  | 51,71 | 48,52 |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 55,19 | 61,30 | 49,65  | 62,07 | 56,20 |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 59,53 | 65,85 | 53,21  | 72,03 | 61,10 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 96,80 | 82,90 | 104,70 | 89,80 | 94,80 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00  | 0,00  | 0,00   | 0,00  | 0,00  |

**Tabulka 7.38:** Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 25. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 63,30  | 85,74  | 36,50  | 101,20 | 60,89  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 105,76 | 119,56 | 69,05  | 118,99 | 87,67  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 135,89 | 138,60 | 100,02 | 138,79 | 121,02 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 179,80 | 92,00  | 268,40 | 168,20 | 217,00 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,02   | 0,00   | 0,05   | 0,00   | 0,02   |

**Tabulka 7.39:** Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 25. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 29,70  | 39,10  | 7,83   | 31,29  | 29,71  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 51,08  | 57,87  | 41,69  | 60,83  | 49,01  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 64,19  | 66,31  | 59,32  | 70,19  | 67,12  |
| Průměrné RTT [ms]                     | 223,50 | 107,20 | 296,00 | 207,90 | 255,90 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.40:** Výsledky testů číslo 1 pro park, 25. 4. 2022 (downstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 127,20 | 63,10  | 81,20  | 74,71  | 40,71  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 156,02 | 108,46 | 115,00 | 106,43 | 60,58  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 177,00 | 129,1  | 158,59 | 145,69 | 102,96 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 116,50 | 188,30 | 184,70 | 192,30 | 341,30 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,71   | 0,01   | 0,00   | 0,08   | 0,00   |

**Tabulka 7.41:** Výsledky testů číslo 2 pro park, 25. 4. 2022 (upstream).

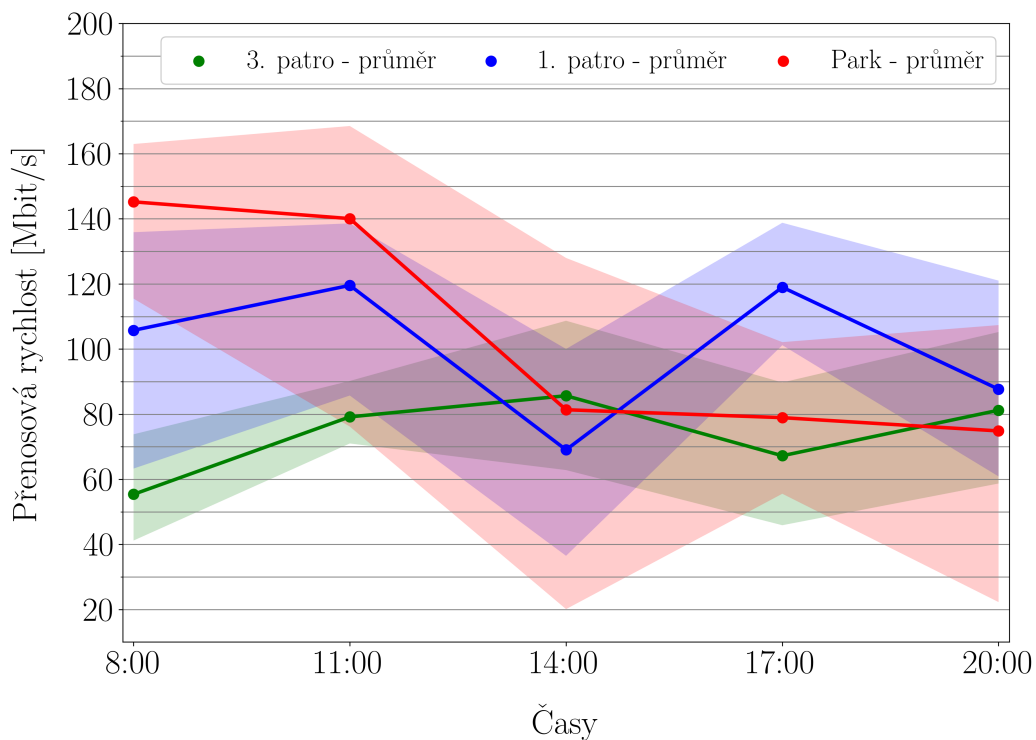
| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 104,86 | 115,30 | 100,12 | 101,59 | 82,65  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 114,15 | 119,51 | 114,31 | 112,60 | 108,91 |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 126,50 | 129,32 | 123,86 | 124,66 | 126,98 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 58,70  | 57,90  | 58,90  | 58,10  | 62,60  |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |

**Tabulka 7.42:** Výsledky testů číslo 3 pro park, 25. 4. 2022 (downstream).

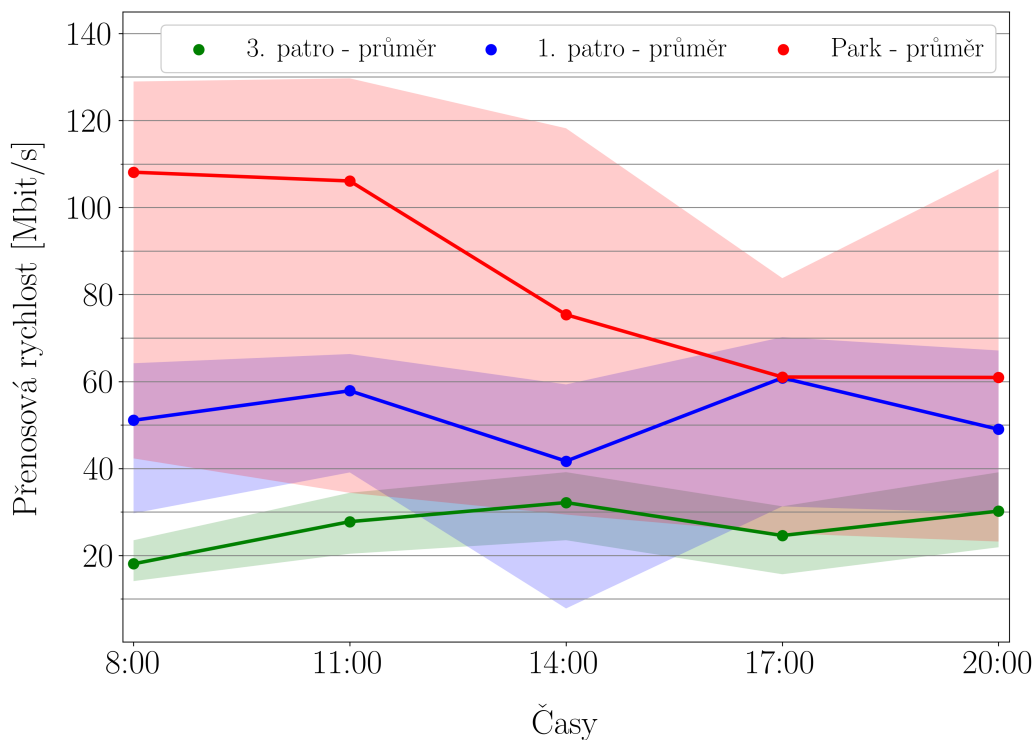
| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 115,50 | 76,20  | 20,12  | 55,56  | 22,28  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 145,22 | 140,07 | 81,36  | 78,93  | 74,85  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 162,98 | 168,51 | 127,98 | 102,12 | 107,36 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 142,60 | 128,90 | 247,20 | 251,40 | 275,50 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,10   | 0,69   | 0,07   | 0,07   |

**Tabulka 7.43:** Výsledky testů číslo 3 pro park, 25. 4. 2022 (upstream).

| Čas                                   | 8:00   | 11:00  | 14:00  | 17:00  | 20:00  |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Minimální přenosová rychlost [Mbit/s] | 42,32  | 34,41  | 29,41  | 25,11  | 23,21  |
| Průměrná přenosová rychlost [Mbit/s]  | 108,11 | 106,09 | 75,36  | 61,03  | 60,93  |
| Maximální přenosová rychlost [Mbit/s] | 128,96 | 129,68 | 118,20 | 83,75  | 108,78 |
| Průměrné RTT [ms]                     | 161,80 | 145,00 | 257,50 | 256,50 | 289,70 |
| Průměrné PLR [%]                      | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,32   | 0,00   |



**Obrázek 7.16:** Graf průměrné přenosové rychlosti, 25. 4. 2022 (downstream).



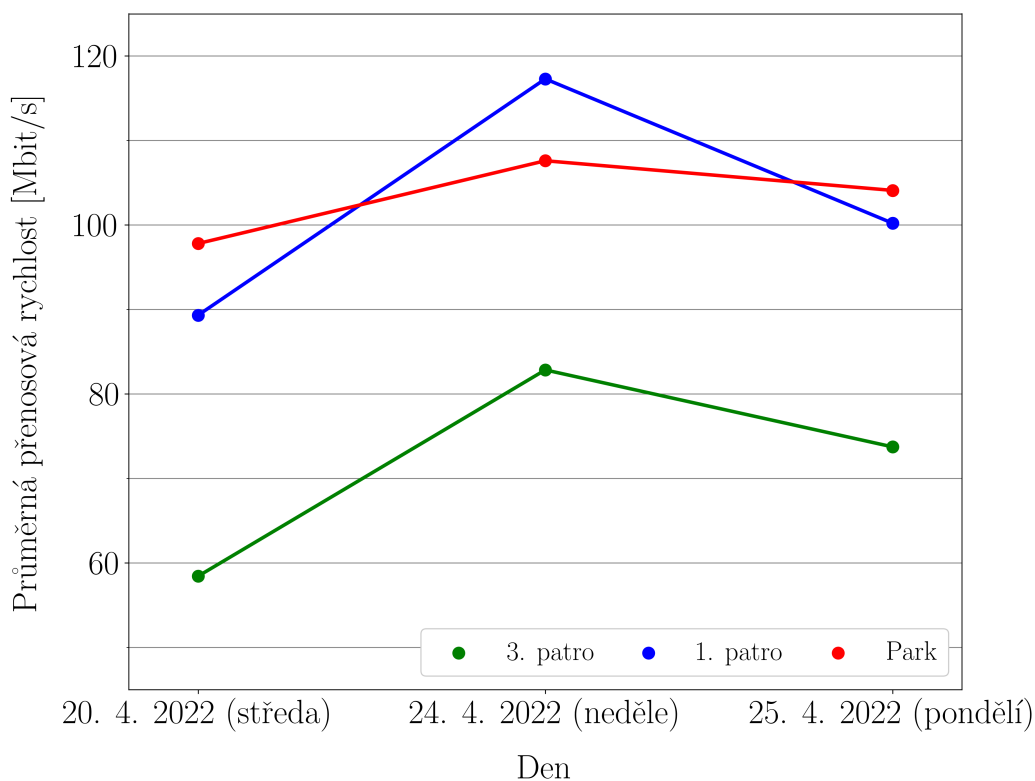
**Obrázek 7.17:** Graf průměrné přenosové rychlosti, 25. 4. 2022 (upstream).

## 7.5 Vyhodnocení měření

V této kapitole jsou pomocí statistických metod zpracovány naměřené parametry z testů číslo 3 kvůli tomu, že tyto výsledky jsou relevantnější, jelikož při těchto testech byla síť více vytížena (testování obou směrů zároveň). Tabulky 7.44 a 7.45 obsahují průměrné přenosové rychlosti za jednotlivé dny pro downstream a upstream. Údaje jsou graficky znázorněny na obrázcích 7.18 a 7.19.

**Tabulka 7.44:** Průměrná přenosová rychlost, jednotlivé dny (downstream).

| Místo    | Průměrná přenosová rychlost ve středu 20. 4. 2022 [Mbit/s] | Průměrná přenosová rychlost v neděli 24. 4. 2022 [Mbit/s] | Průměrná přenosová rychlost v pondělí 25. 4. 2022 [Mbit/s] |
|----------|--|---|--|
| 3. patro | 58,42  | 82,84   | 73,73  |
| 1. patro | 89,31  | 117,29  | 100,21   |
| Park     | 97,80  | 107,60  | 104,09   |

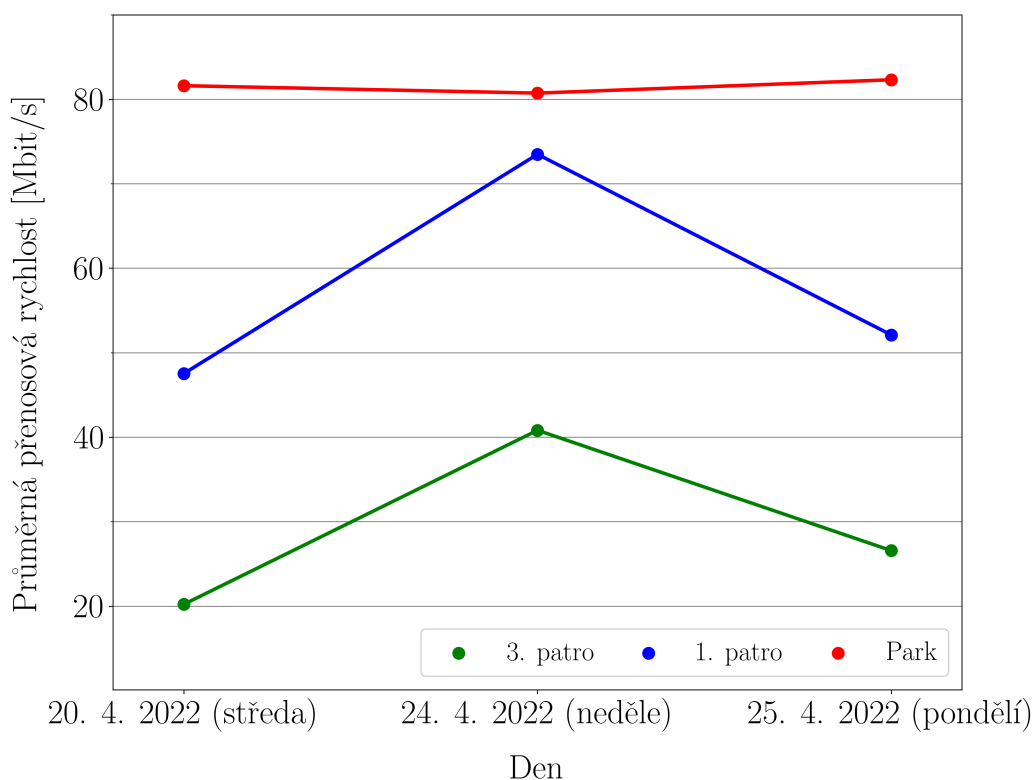


**Obrázek 7.18:** Graf průměrné přenosové rychlosti, jednotlivé dny (downstream).



**Tabulka 7.45:** Průměrná přenosová rychlost, jednotlivé dny (upstream).

| Místo    | Průměrná přenosová rychlost ve středu<br>20. 4. 2022 [Mbit/s] | Průměrná přenosová rychlost v neděli<br>24. 4. 2022 [Mbit/s] | Průměrná přenosová rychlost v pondělí<br>25. 4. 2022 [Mbit/s] |
|----------|---|--|---|
| 3. patro | 20,21   | 40,81  | 26,57   |
| 1. patro | 47,52   | 73,48  | 52,10   |
| Park     | 81,60   | 80,72  | 82,30   |



**Obrázek 7.19:** Graf průměrné přenosové rychlosti, jednotlivé dny (upstream).

Nejvyšší průměrné přenosové rychlosti pro downstream ve 3. a 1. patře panelového domu byly naměřeny v neděli, nejspíš v důsledku nízkého konkurenčního provozu oproti pondělí a střede. Z naměřených hodnot je zřejmé, že vysoké RTT má souvislost s nízkou přenosovou rychlostí. Hodnota PLR byla většinou naměřena blízko 0 %. Nastává zde jen pár výjimek, které jsou situovány okolo 1 %. Pro upstream je typické menší kolísání přenosových rychlostí oproti downstreamu, což se potvrdilo ve většině případech.

Parametry mobilních sítí jsou výrazně dynamické. Přenosová rychlost mobilních sítí je ovlivněna několika faktory. Závisí například na tom, jak daleko

je uživatel od vysílače, na šířce kmitočtového pásma, z jakého materiálu je postavena budova, v níž se uživatel nachází, nebo kolik lidí v okolí je připojeno k základnové stanici v daný moment. Teoretická kapacita komunikačního kanálu je určena Shannon-Hartleyovým zákonem

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right), \quad (7.1)$$

kde  $C$  je kapacita kanálu v bit/s,  $B$  je šířka kmitočtového pásma kanálu v Hz a  $S/N$  je poměr výkonu užitečného signálu k šumu v kanále. Dále parametry, jako je zpoždění ve smyčce a ztrátovost paketů, mají velký vliv na přenosovou rychlost kvůli několikvrstvému regulačnímu mechanismu protokolu TCP, do kterého spadá náběh, opakování paketů a velikost okna.

Pro vyhodnocení z hlediska požadavků na sítě a jejich splnění byly využity tabulky 5.2 a 5.3, které jsou závěrem diplomové práce *Prognóza požadavků na datové přenosy gigabitové společnosti* [39], dále jen prognóza. Jedná se o odhad nárůstu datových toků do roku 2025 pro domácí přípojky. Pro downstream byla predikována běžně dostupná přenosová rychlost pro 2 účastníky 45 Mbit/s, pro 3 účastníky 54 Mbit/s a pro 4 účastníky 60 Mbit/s. Jako maximální přenosová rychlost byla predikována pro 2 účastníky 91 Mbit/s, pro 3 účastníky 108 Mbit/s a pro 4 účastníky 121 Mbit/s. Pro upstream byla predikována běžně dostupná přenosová rychlost pro 2 účastníky 7 Mbit/s, pro 3 účastníky 8 Mbit/s a pro 4 účastníky 9 Mbit/s. Jako maximální přenosová rychlost byla predikována pro 2 účastníky 14 Mbit/s, pro 3 účastníky 17 Mbit/s a pro 4 účastníky 18 Mbit/s.

Při měření mobilních sítí 5G NSA pro upstream byly naměřeny ve 3. a 1. patře, kde by potenciálně mohlo být využíváno připojení k Internetu pomocí 5G FWA, všechny hodnoty vyšší, než jsou uvedeny v prognóze pro všechny uvedené typy přenosových rychlostí a počty účastníků.

V případě downstreamu byly ve 3. a 1. patře naměřeny vyšší hodnoty (až na jednu, která je o 2 Mbit/s nižší), než jsou uvedeny v prognóze pro běžně dostupnou přenosovou rychlost. Nižší naměřená hodnota oproti prognóze pro 4 účastníky byla naměřena ve 3. patře ve středu 20. 4. 2022.

Všechny naměřené hodnoty pro downstream ve 3. patře byly nižší, než jsou uvedeny v prognóze pro maximální dostupnou přenosovou rychlost. V 1. patře byly v neděli naměřeny vyšší hodnoty, než jsou predikovány pro 2 a 3 účastníky, a to o 9 Mbit/s. Ve středu byly naměřeny vyšší hodnoty, než jsou predikovány pro 2 účastníky, a to o 9 Mbit/s. Zbylé hodnoty z 1. patra byly nižší než hodnoty z prognózy.

# Závěr

V rámci této bakalářské práce byla popsána cesta ke gigabitové společnosti, prozkoumány varianty technologií blíží se k přenosové rychlosti 1 Gbit/s, analyzována současná situace v České republice ohledně mobilních sítí 5G, analyzovány datové přenosy, shrnuty prognózy požadavků na datové přenosy, popsány metody měření datového připojení a provedeno měření mobilních sítí 5G NSA pomocí měřicího zařízení F-Tester 5G.

Podmínky pro gigabitovou společnost v České republice mají zajistit sítě VHCN, pod které spadají optické sítě, mobilní sítě 5G a hybridní sítě. Pro rozvoj mobilních sítí 5G je nutné připojovat základnové stanice 5G optickými vlákny (mobilní backhaul), aby nevznikala úzká hrdla a nedošlo tak k omezení služeb mobilních sítí 5G. Dále je klíčové zpřístupnit kmitočtové pásmo 26 GHz, což umožní uživatelům dosahovat přenosovou rychlost blíží se k 1 Gbit/s.

Celosvětovým trendem je neustálý nárůst počtu aktivních uživatelů Internetu a nárůst objemu přenášených dat. Hlavním předmětem zájmů je přenosová rychlost v sestupném směru. Nejobjemnější částí datového provozu jsou služby video streamingu, video na vyžádání a IPTV kvůli zvyšování rozlišení obrazu. Propagování navyšování kapacity internetové přípojky přestává mít smysl, jelikož mezník 1 Gbit/s má obrovskou rezervu a pro běžného uživatele i vícečlenné domácnosti je nemožné tuto rezervu vyplnit.

U služeb jako je video streaming, video na vyžádání a IPTV je nutné také počítat s tím, že jsou neustále zlepšované kompresní metody, které jsou implementovány jak v nejnovějších standardech u terestriální televize, tak i ve streamingových platformách. To znamená, že díky efektivnějším kompresním metodám zde není takový razantní nárůst přenosových rychlostí, jak by se dalo očekávat. Dále je nutné vzít v potaz, zda uživatelé budou běžně na svých zařízeních využívat vysoká rozlišení ve 4K nebo i vyšší. Rozlišení 1K se jeví jako dostatečné pro mobilní zařízení a pro osobní počítače.

V praktické části této práce byly měřeny mobilní sítě 5G NSA od operátora Vodafone pomocí měřicího zařízení F-Tester 5G. Naměřené parametry byly zpracovány pomocí statistických metod z testů, ve kterých proběhlo testování obou směrů zároveň kvůli tomu, že tyto výsledky jsou relevantnější, jelikož při těchto testech byla síť více vytížena. Každý den proběhlo 5 měření od 8 hodin do 20 hodin v přibližných intervalech tří hodin, a to ve středu 20. 4. 2022, neděli 24. 4. 2022 a pondělí 25. 4. 2022. Měřilo se v panelovém domě (uvnitř za oknem ve 3. a 1. patře) a v parku. Testování parametrů mobilních sítí uvnitř místnosti u okna simulovalo typické místo pro umístění zařízení CPE, které poskytuje připojení k Internetu pomocí 5G FWA. Park byl vybrán, protože zde nedocházelo k výrazným odrazům signálu.

Výsledná průměrná přenosová rychlost dosahovaná v sestupném směru během středy 20. 4. 2022 ve 3. patře vyšla 58 Mbit/s, v 1. patře 89 Mbit/s a v parku 98 Mbit/s. V neděli 24. 4. 2022 ve 3. patře vyšla 83 Mbit/s, v 1. patře 117 Mbit/s a v parku 108 Mbit/s. V pondělí 25. 4. 2022 ve 3. patře vyšla 74 Mbit/s, v 1. patře 100 Mbit/s a v parku 104 Mbit/s. Výsledná průměrná přenosová rychlost dosahovaná ve vzestupném směru během středy 20. 4. 2022 ve 3. patře vyšla 20 Mbit/s, v 1. patře 48 Mbit/s a v parku 82 Mbit/s. V neděli 24. 4. 2022 ve 3. patře vyšla

41 Mbit/s, v 1. patře 74 Mbit/s a v parku 81 Mbit/s. V pondělí 25. 4. 2022 ve 3. patře vyšla 27 Mbit/s, v 1. patře 52 Mbit/s a v parku 82 Mbit/s.

Z měření vyplývá, že parametry mobilních sítí jsou výrazně dynamické, jelikož jsou ovlivněny několika faktory. Parametry, jako je zpoždění ve smyčce a ztrátovost paketů, mají velký vliv na přenosovou rychlost kvůli několikvrstvému regulačnímu mechanismu protokolu TCP. Z naměřených hodnot je zřejmé, že vysoké zpoždění ve smyčce má souvislost s nízkou přenosovou rychlostí. Dále závisí například na tom, jak daleko je uživatel od vysílače, na šířce kmitočtového pásma, z jakého materiálu je postavena budova, v níž se uživatel nachází, nebo kolik lidí v okolí je připojeno k základnové stanici v daný moment. Nejvyšší průměrné přenosové rychlosti pro sestupný směr ve 3. a 1. patře panelového domu byly naměřeny v neděli, nejspíš v důsledku nízkého konkurenčního provozu oproti pondělí a středě.

Naměřené parametry byly porovnány se závěrem diplomové práce *Prognóza požadavků na datové přenosy gigabitové společnosti* [39], která odhaduje nárůstu datových toků do roku 2025 pro domácí přípojky. Pro vzestupný směr, kde byly v pondělí, středu a neděli v pěti vybraných časech v panelovém domě naměřeny průměrné přenosové rychlosti mezi 20 a 74 Mbit/s, byly všechny hodnoty vyšší a s dostatečnou rezervou, než je závěrem prognózy. Pro sestupný směr, kde byly naměřeny průměrné přenosové rychlosti mezi 58 a 117 Mbit/s, byly hodnoty pro běžně dostupnou přenosovou rychlost, až na jednu, vyšší, než je závěrem prognózy.

Výsledky této práce ukázaly, že očekávané nárůsty přenosové rychlosti pro domácí přípojky dle prognózy pro rok 2025 byly pokryty pomocí mobilních sítí 5G NSA, přes které je možnost poskytovat připojení k Internetu pomocí 5G FWA. Další možné směřování této práce by mohlo být měření na kmitočtovém pásmu 26 GHz, až bude zařazeno do provozu, nebo měřit parametry mobilních sítí 5G SA, až bude na území České republiky dostupná.

# Seznam použité literatury

- [1] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Národní plán rozvoje sítí s velmi vysokou kapacitou* [online]. 2021. [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2021/3/149908-21\\_III\\_mat\\_VHCN.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2021/3/149908-21_III_mat_VHCN.pdf)
- [2] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Národní plán rozvoje sítí nové generace* [online]. 2016. [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2016/11/NPRSN-G-27-9-2016.pdf>
- [3] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. *Optické přístupové sítě FTTx a NGA*. 2. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019. ISBN 978-80-01-06552-5.
- [4] *Veřejná konzultace – mapa* [online]. [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: <https://www.verejnakonzultace.cz/pokryti-am-2021/mapa>
- [5] GRANT THORNTON ADVISORY. *Analýza stavu rozvoje sítí NGA v ČR pro zajištění přístupu k vysokorychlostnímu internetu dostupným v pevném místě* [online]. 2020. [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2020/2/Zaverecna-zprava\\_GTA\\_12\\_12\\_2019.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2020/2/Zaverecna-zprava_GTA_12_12_2019.pdf)
- [6] BERGAN, Brad. *Japan Has Shattered the Internet Speed Record at 319 Terabits per Second* [online]. 2021. [cit. 2021-09-30]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/japan-shattered-internet-speed-record-319-terabits>
- [7] BEČVÁŘ, Zdeněk, Pavel MACH a Ivan PRAVDA. *Mobilní sítě*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05305-8.
- [8] WESTBASE. *What is LTE-Advanced Pro* [online]. 2019. [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: <https://www.westbase.io/what-is-lte-advanced-pro-mean-iot>
- [9] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Implementace a rozvoj sítí 5G v České republice* [online]. 2021. [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2020/1/Material-5G\\_13-12-2019.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2020/1/Material-5G_13-12-2019.pdf)
- [10] GSMA. *The 5G Guide a Reference for Operators* [online]. 2019. [cit. 2021-09-13]. Dostupné z: [https://www.gsma.com/wp-content/uploads/2019/04/The-5G-Guide\\_GSMA\\_2019\\_04\\_29\\_compressed.pdf](https://www.gsma.com/wp-content/uploads/2019/04/The-5G-Guide_GSMA_2019_04_29_compressed.pdf)

- [11] REMMERT, Harald. *What is 5G Network Architecture* [online]. 2021. [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: <https://www.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>
- [12] OFCOM. *Update on 5G spectrum in the UK* [online]. 2017. [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: [https://www.ofcom.org.uk/\\_\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0021/97-023/5G-update-08022017.pdf](https://www.ofcom.org.uk/___data/assets/pdf_file/0021/97-023/5G-update-08022017.pdf)
- [13] CARDWELL, Ben. *The 5G Future Begins Now* [online]. 2019. [cit. 2021-10-21]. Dostupné z: <https://www.commscope.com/Blog/The-5G-Future-Begins-Now>
- [14] HOLMA, Harri, Antti TOSKALA a Takehiro NAKAMURA. *5G Technology: 3GPP New Radio*. Wiley, 2020. ISBN: 978-11-192-3628-3.
- [15] QUALCOMM. *How 5G massive MIMO transforms your mobile experiences* [online]. 2019. [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/06/20/how-5g-massive-mimo-transforms-your-mobile-experiences>
- [16] JAKOUBOVÁ, Veronika. *Cesta k nižší latenci: co je edge computing* [online]. 2020. [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: <https://www.master.cz/blog/edge-computing-slibuje-nizsi-latenci/>
- [17] METASWITCH. *What is 5G Fixed Wireless Access (FWA)* [online]. 2020. [cit. 2021-10-21]. Dostupné z: <https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-5g-fixed-wireless-access-fwa>
- [18] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Monitorovací zpráva* [online]. 2021. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files-obsah/ctu/monitorovaci-zprava-c.1/2021/obrazky/mz-2021-1.pdf>
- [19] O2. *Výroční zpráva 2020* [online]. 2020. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: [https://www.o2.cz/file\\_conver/680651/VZ\\_2020\\_CZ\\_grafika.pdf](https://www.o2.cz/file_conver/680651/VZ_2020_CZ_grafika.pdf)
- [20] O2. *Pololetní zpráva 2021* [online]. 2021. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: [https://www.o2.cz/file\\_conver/681782/Pololetni\\_zprava\\_2021.pdf](https://www.o2.cz/file_conver/681782/Pololetni_zprava_2021.pdf)
- [21] O2 – *mapa pokrytí* [online]. 2022. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.o2.cz/osobni/mapa-pokryti>
- [22] VODAFONE. *Tisková zpráva* [online]. 2021. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/o-vodafone/o-spolecnosti/pro-media/tiskove-zpravy/detail/vodafone-rozsiril-pokryti-5g-nejrychlejsi-mobilni>
- [23] VODAFONE. *Vodafone pokryl síť 5G už přes 50 % populace. Jde o stovky měst i menších obcí* [online]. 2021. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/nejen-pro-media/tiskove-zpravy/vodafone-pokryl-siti-5g-uz-pres-50-populace-jde-o>
- [24] *Vodafone – mapa pokrytí* [online]. 2021. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/mapa-pokryti>

- [25] MOBILENET. *T-Mobile za minulý měsíc zdvojnásobil pokrytí ČR sítěmi 5G* [online]. 2021. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://mobilenet.cz/clanky/t-mobile-za-minuly-mesic-zdvojnasil-pokryti-cr-sitemi-5g-44429>
- [26] T-MOBILE. *Souhrnná výroční zpráva 2020* [online]. 2020. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.t-mobile.cz/dcpublish/vyrocnizprava-2020-cz.pdf>
- [27] NORDIC TELECOM. *Ceník služeb* [online]. 2021. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: [https://nordictelecom.cz/media/filer\\_public/2f/e2/2fe2fd69-c742-4a9b-a7de-d53e1408d53e/cenik\\_sluzeb-nt-01112021.pdf](https://nordictelecom.cz/media/filer_public/2f/e2/2fe2fd69-c742-4a9b-a7de-d53e1408d53e/cenik_sluzeb-nt-01112021.pdf)
- [28] KAPRAIN. *Centronet (Nej.cz) uspěl v aukci 5G, získal frekvenci 3,5 GHz* [online]. 2020. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.kaprain.cz/novinky/centronet-ze-skupiny-kaprain-uspel-v-aukci-5g-ziskal-frekvenci-35-ghz>
- [29] *Veřejné širokopásmové sítě 4G a 5G* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://digi.ctu.cz/pokryti/pokryti/pokryti/pokryti>
- [30] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Národní plán obnovy* [online]. 2021. [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/elekunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/narodni-plan-obnovy-pro-oblast-elektronickych-komunikaci-261491>
- [31] DATAREPORTAL. *Digital 2021: Czechia* [online]. 2021. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://datareportal.com/reports/digital-2021-czechia>
- [32] INTERNET WORLD STATS. *Internet Growth Statistics* [online]. 2020. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://www.internetworldstats.com/emarketing.htm>
- [33] EINDHOVEN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. *Beyond fast: how the speed of residential internet access will develop between now and 2022* [online]. 2016. [cit. 2022-01-31]. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws-portalfiles/portal/76294507>
- [34] YOUTUBE HELP. *System requirements* [online]. 2021. [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: <https://support.google.com/youtube/answer/78358?hl=en>
- [35] ACTIVISION. *Minimum and Recommended System Requirements for Call of Duty: Modern Warfare on PC* [online]. 2021 [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: <https://support.activision.com/modern-warfare/articles/minimum-and-recommended-system-requirements-for-call-of-duty-modern-warfare-on-pc>
- [36] ŠTAJER, Michal. *Google Stadia má konečně svůj seznam her, požadavky na internet, ceny a datum spuštění* [online]. 2019. [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: <https://www.techarena.cz/google-stadia-ma-konecne-svuj-seznam-her-pozadavky-na-internet-ceny-a-datum-spusteni/n-866>

- [37] CISCO. *Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022* [online]. 2019. [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: <https://twiki.cern.ch/twiki/pub-HEPIX/TechwatchNetwork/HtwNetworkDocuments/white-paper-c11-7414-90.pdf>
- [38] GODLOVITCH, Ilsa et al. *Regulatory, in particular access, regimes for network investment models in Europe*. European Commission. 2016. ISBN: 978-92-79-61823-9.
- [39] LYTVYN, Ivan. *Prognóza požadavků na datové přenosy gigabitové společnosti*. Praha, 2020. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra telekomunikační techniky.
- [40] VODRÁŽKA, Jiří a Petr JAREŠ. *Testování nové generace internetových přípojek (NGA)* [online]. Portál inovace vyššího odborného vzdělávání, 2019. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/521/page17.html>
- [41] *NetTest* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://nettest.cz>
- [42] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů pevných sítí elektronických komunikací*. Verze 2.1 [online]. 2021. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu-new/ochrana-spotrebitele/kontrola-a-mereni/metodika-pro-mereni-a-vyhodnoceni-datovych-parametru-pevnych-siti-ek-2-1.pdf>
- [43] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Vyjádření Českého telekomunikačního úřadu k vybraným otázkám přístupu k otevřenému internetu a evropským pravidlům síťové neutrality* [online]. 2017. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu/vyjadreniceskeho-telekomunikacniho-uradu-k-vybranim-otazkam-pristupu-k-otevrenemu-internetu/obrazky/vyjadreniceskehotelekomunikacnihouradukvybranymotazkampristupukotevrenemuinternetuaevoevropskympravidlu.pdf>
- [44] HUSTON, Geoff. *BBR, the new kid on the TCP block* [online]. 2017. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://blog.apnic.net/2017/05/09/bbr-new-kid-tcp-block>
- [45] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů mobilních sítí elektronických komunikací*. Verze 2.3 [online]. 2021. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/ctu-new/ochrana-spotrebitele/kontrola-a-mereni/metodika-pro-mereni-a-vyhodnoceni-datovych-parametru-mobilnich-siti-ek-2-3.pdf>
- [46] *F-Tester – měření datových sítí* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://f-tester.fel.cvut.cz>
- [47] *GSMweb* [online]. [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://gsmweb.cz>



# Seznam obrázků

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Pokrytí ČR podle deklarované rychlosti [4]. . . . .                     | 6  |
| 1.2  | Architektura sítě VHCN [5]. . . . .                                     | 9  |
| 3.1  | Příklad mobilních sítí 5G [10]. . . . .                                 | 16 |
| 3.2  | Příklad využití 5G pásem pro různé aplikační scénáře [12]. . . . .      | 17 |
| 3.3  | Architektura 5G sítě [11]. . . . .                                      | 18 |
| 3.4  | Přehled nabídek produktů 5G FWA [10]. . . . .                           | 23 |
| 4.1  | Mapa pokrytí pásmy 1800 MHz a 2100 MHz (O2) [29]. . . . .               | 26 |
| 4.2  | Mapa pokrytí pásmy 1800 MHz a 2100 MHz (Vodafone) [29]. . . . .         | 26 |
| 4.3  | Mapa pokrytí pásmy 700 MHz a 2100 MHz (T-Mobile) [29]. . . . .          | 27 |
| 6.1  | Srovnání chování algoritmů Reno, Cubic a BBR [44]. . . . .              | 39 |
| 7.1  | Schéma zapojení měřicí sestavy. . . . .                                 | 45 |
| 7.2  | Měřicí sestava. . . . .   | 46 |
| 7.3  | Přední strana F-Testeru. . . . .  | 47 |
| 7.4  | Zadní strana F-Testeru. . . . .   | 47 |
| 7.5  | Mapa zobrazující měřená místa a základnové stanice [47]. . . . .        | 48 |
| 7.6  | Panelový dům. . . . .   | 48 |
| 7.7  | Nové sídliště A. . . . .  | 49 |
| 7.8  | Nové sídliště B. . . . .  | 49 |
| 7.9  | Park. . . . .   | 49 |
| 7.10 | Grafické znázornění sekvence deseti testů v závislosti na čase. . . . . | 50 |
| 7.11 | Grafické znázornění sekvence tří testů v závislosti na čase. . . . .    | 53 |
| 7.12 | Graf průměrné přenosové rychlosti, 20. 4. 2022 (downstream). . . . .    | 59 |
| 7.13 | Graf průměrné přenosové rychlosti, 20. 4. 2022 (upstream). . . . .      | 59 |
| 7.14 | Graf průměrné přenosové rychlosti, 24. 4. 2022 (downstream). . . . .    | 64 |
| 7.15 | Graf průměrné přenosové rychlosti, 24. 4. 2022 (upstream). . . . .      | 64 |
| 7.16 | Graf průměrné přenosové rychlosti, 25. 4. 2022 (downstream). . . . .    | 69 |
| 7.17 | Graf průměrné přenosové rychlosti, 25. 4. 2022 (upstream). . . . .      | 69 |
| 7.18 | Graf průměrné přenosové rychlosti, jednotlivé dny (downstream). . . . . | 70 |
| 7.19 | Graf průměrné přenosové rychlosti, jednotlivé dny (upstream). . . . .   | 71 |
| A.1  | Úvodní obrazovka webového rozhraní F-Testeru 5G. . . . .                | 87 |
| A.2  | Příklad vygenerovaného grafu z F-Testeru 5G (zkušební testy). . . . .   | 87 |



# Seznam tabulek

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Variety pasivních optických sítí [3]. . . . .   | 13 |
| 3.1  | Přenosové rychlosti mobilních generací [7, 8]. . . . .  | 15 |
| 3.2  | Požadavky na mobilní síť 5G [14]. . . . .   | 24 |
| 4.1  | Výsledky aukce kmitočtových pásem [18]. . . . .   | 25 |
| 5.1  | Růst počtu uživatelů Internetu [32]. . . . .  | 29 |
| 5.2  | Nárůst přenosové rychlosti v sestupném směru (2025) [39]. . . . .                               | 35 |
| 5.3  | Nárůst přenosové rychlosti ve vzestupném směru (2025) [39]. . . . .                             | 35 |
| 7.1  | Testy typu Iperf3 pro sestupný směr (downstream). . . . .                                       | 50 |
| 7.2  | Testy typu Iperf3 pro vzestupný směr (upstream). . . . .  | 50 |
| 7.3  | Průměrné přenosové rychlosti pro downstream odpovídající místům a číslu testu v Mbit/s. . . . . | 51 |
| 7.4  | Průměrné RTT pro downstream odpovídající místům a číslu testu v milisekundách. . . . .          | 51 |
| 7.5  | Průměrné přenosové rychlosti pro upstream odpovídající místům a číslu testu v Mbit/s. . . . .   | 52 |
| 7.6  | Průměrné RTT pro upstream odpovídající místům a číslu testu v milisekundách. . . . .            | 52 |
| 7.7  | Nastavení testů číslo 1 a 2. . . . .  | 54 |
| 7.8  | Výsledky testů číslo 1 pro 3. patro, 20. 4. 2022 (downstream). . . . .                          | 55 |
| 7.9  | Výsledky testů číslo 2 pro 3. patro, 20. 4. 2022 (upstream). . . . .                            | 55 |
| 7.10 | Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 20. 4. 2022 (downstream). . . . .                          | 55 |
| 7.11 | Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 20. 4. 2022 (upstream). . . . .                            | 56 |
| 7.12 | Výsledky testů číslo 1 pro 1. patro, 20. 4. 2022 (downstream). . . . .                          | 56 |
| 7.13 | Výsledky testů číslo 2 pro 1. patro, 20. 4. 2022 (upstream). . . . .                            | 56 |
| 7.14 | Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 20. 4. 2022 (downstream). . . . .                          | 57 |
| 7.15 | Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 20. 4. 2022 (upstream). . . . .                            | 57 |
| 7.16 | Výsledky testů číslo 1 pro park, 20. 4. 2022 (downstream). . . . .                              | 57 |
| 7.17 | Výsledky testů číslo 2 pro park, 20. 4. 2022 (upstream). . . . .                                | 58 |
| 7.18 | Výsledky testů číslo 3 pro park, 20. 4. 2022 (downstream). . . . .                              | 58 |
| 7.19 | Výsledky testů číslo 3 pro park, 20. 4. 2022 (upstream). . . . .                                | 58 |
| 7.20 | Výsledky testů číslo 1 pro 3. patro, 24. 4. 2022 (downstream). . . . .                          | 60 |
| 7.21 | Výsledky testů číslo 2 pro 3. patro, 24. 4. 2022 (upstream). . . . .                            | 60 |
| 7.22 | Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 24. 4. 2022 (downstream). . . . .                          | 60 |
| 7.23 | Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 24. 4. 2022 (upstream). . . . .                            | 61 |
| 7.24 | Výsledky testů číslo 1 pro 1. patro, 24. 4. 2022 (downstream). . . . .                          | 61 |
| 7.25 | Výsledky testů číslo 2 pro 1. patro, 24. 4. 2022 (upstream). . . . .                            | 61 |
| 7.26 | Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 24. 4. 2022 (downstream). . . . .                          | 62 |
| 7.27 | Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 24. 4. 2022 (upstream). . . . .                            | 62 |
| 7.28 | Výsledky testů číslo 1 pro park, 24. 4. 2022 (downstream). . . . .                              | 62 |
| 7.29 | Výsledky testů číslo 2 pro park, 24. 4. 2022 (upstream). . . . .                                | 63 |
| 7.30 | Výsledky testů číslo 3 pro park, 24. 4. 2022 (downstream). . . . .                              | 63 |
| 7.31 | Výsledky testů číslo 3 pro park, 24. 4. 2022 (upstream). . . . .                                | 63 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 7.32 | Výsledky testů číslo 1 pro 3. patro, 25. 4. 2022 (downstream). | 65 |
| 7.33 | Výsledky testů číslo 2 pro 3. patro, 25. 4. 2022 (upstream).   | 65 |
| 7.34 | Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 25. 4. 2022 (downstream). | 65 |
| 7.35 | Výsledky testů číslo 3 pro 3. patro, 25. 4. 2022 (upstream).   | 66 |
| 7.36 | Výsledky testů číslo 1 pro 1. patro, 25. 4. 2022 (downstream). | 66 |
| 7.37 | Výsledky testů číslo 2 pro 1. patro, 25. 4. 2022 (upstream).   | 66 |
| 7.38 | Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 25. 4. 2022 (downstream). | 67 |
| 7.39 | Výsledky testů číslo 3 pro 1. patro, 25. 4. 2022 (upstream).   | 67 |
| 7.40 | Výsledky testů číslo 1 pro park, 25. 4. 2022 (downstream).     | 67 |
| 7.41 | Výsledky testů číslo 2 pro park, 25. 4. 2022 (upstream).       | 68 |
| 7.42 | Výsledky testů číslo 3 pro park, 25. 4. 2022 (downstream).     | 68 |
| 7.43 | Výsledky testů číslo 3 pro park, 25. 4. 2022 (upstream).       | 68 |
| 7.44 | Průměrná přenosová rychlost, jednotlivé dny (downstream).      | 70 |
| 7.45 | Průměrná přenosová rychlost, jednotlivé dny (upstream).        | 71 |

# Seznam použitých zkratek

- 2G** Mobilní síť druhé generace
- 3D** Three Dimensional
- 3GPP** 3rd Generation Partnership Project
- 3G** Mobilní síť třetí generace
- 4G** Mobilní síť čtvrté generace
- 5G** Mobilní síť páté generace
- ADSL+** Asymmetric Digital Subscriber Line
- APON** Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network
- BB** Bottleneck Bandwidth
- BBR** Bottleneck Bandwidth and Round-trip
- BDP** Bandwidth Delay Product
- BEREC** Body of European Regulators for Electronic Communications
- BERT** Bit Error Rate Test
- BPON** Broadband Passive Optical Network
- CATV** Cable Television
- CESNET** Czech Educational and Scientific Network
- CO** Central Office
- CPE** Customer Premises Equipment
- CWDM** Coarse Wavelength Division Multiplexing
- ČTÚ** Český telekomunikační úřad
- ČVUT** České vysoké učení technické v Praze
- DOCSIS** Data Over Cable Service Interface Specification
- DP** Distribution Point
- DSLAM** Digital Subscriber Line Access Multiplexer
- DWDM** Dense Wavelegth Division Multipexing
- EDFA** Erbium Dropped Fiber Amplifier
- eMMB** enhance Mobile Broadband

**EPC** Evolved Packet Core

**FEL** Fakulta elektrotechnická

**FSO** Free Space Optics

**FTTB** Fiber To The Building

**FTTC** Fiber To The Curb

**FTTdp** Fiber To The Distribution Point

**FTTH** Fiber To The Home

**FTTx** Fiber To The x

**FWA** Fixed Wireless Access

**G.fast** Gigabit Digital Subscriber Line

**G.mgfast** Multi-Gigabit Digital Subscriber Line

**GEPON** Gigabit Ethernet Passive Optical Network

**GPON** Gigabit Passive Optical Network

**GRPS** General Packet Radio Service

**GSM** Global System for Mobile Communications

**HD** High Definition

**HSDPA** High Speed Downlink Packet Access

**HSUPA** High Speed Uplink Packet Access

**IMT-2020** International Mobile Telecommunications-2020

**IoT** Internet of Things

**IP** Internet Protocol

**IPTV** Internet Protocol Television

**ITU** International Telecommunication Union

**LAN** Local Area Network

**LTE** Long Term Evolution

**LTE-A** Long Term Evolution Advanced

**M2M** Machine to Machine

**mMIMO** masive Multiple Input Multiple Output

**MIMO** Multiple Input Multiple Output

**MMS** Maximum Segment Size

**mMTC** Massive Machine Type Communication

**NGA** Next Generation Access

**NGMN** Next generation Mobile Network

**NG-PON2** Next-Generation Passive Optical Network 2

**NIX** Neutral Internet eXchange

**NSA** Non-Standalone

**PC** Personal Computer

**PON** Passive Optical Network

**PoP** Point of Presence

**PRBS** Pseudo Random Binary Sequence

**RAN** Radio Access Network

**RJ-45** Registered Jack-45

**PLR** Packet Loss Rate

**RTT** Round Trip Time

**RWND** Receive Window

**SA** Standalone

**SAM** Service Activation Methodology

**SD** Standard Definition

**SFP** Small Form-factor Pluggable

**SIM** Subscriber Identity Module

**SOA** Semiconductor Optical Amplifier

**TCP** Transmission Control Protocol

**TDM PON** Time Division Multiplex Passive Optical Network

**TDSL** Terabit DSL

**TEN-T** Trans-European Transport Networks

**UDP** User Datagram Protocol

**UE** User Equipment

**UHD** Universal High Definition

**UMTS** Universal Mobile Telecommunications System

**URLLC** Ultra Reliable and Low Latency

**USB** Universal Serial Bus

**VHCN** Very High Capacity Network

**WAN** Wide Area Network

**WDM** Wavelength Division Multiplexing

**Wi-Fi** Wireless Fidelity

**WiMAX** Worldwide Interoperability for Microwave Access

**WTTB** Wireless to the Building

**xDSL** Digital Subscriber Line

**XG-PON** X Gigabit Passive Optical Network

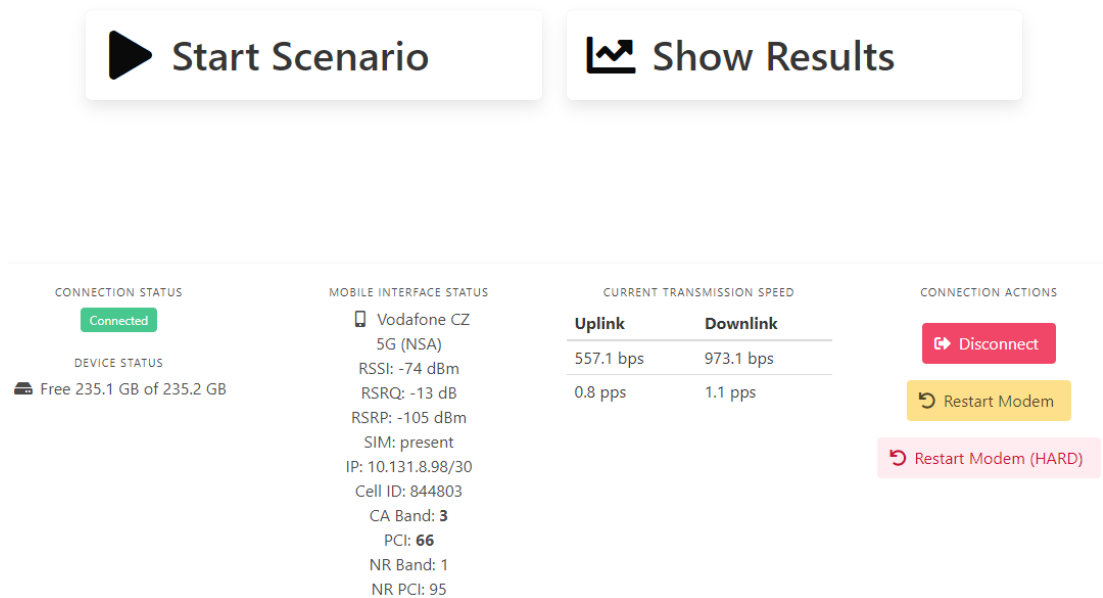
**XGS-PON** X Gigabit Symmetric Passive Optical Network

**ZSJ** Základní sídelní jednotka

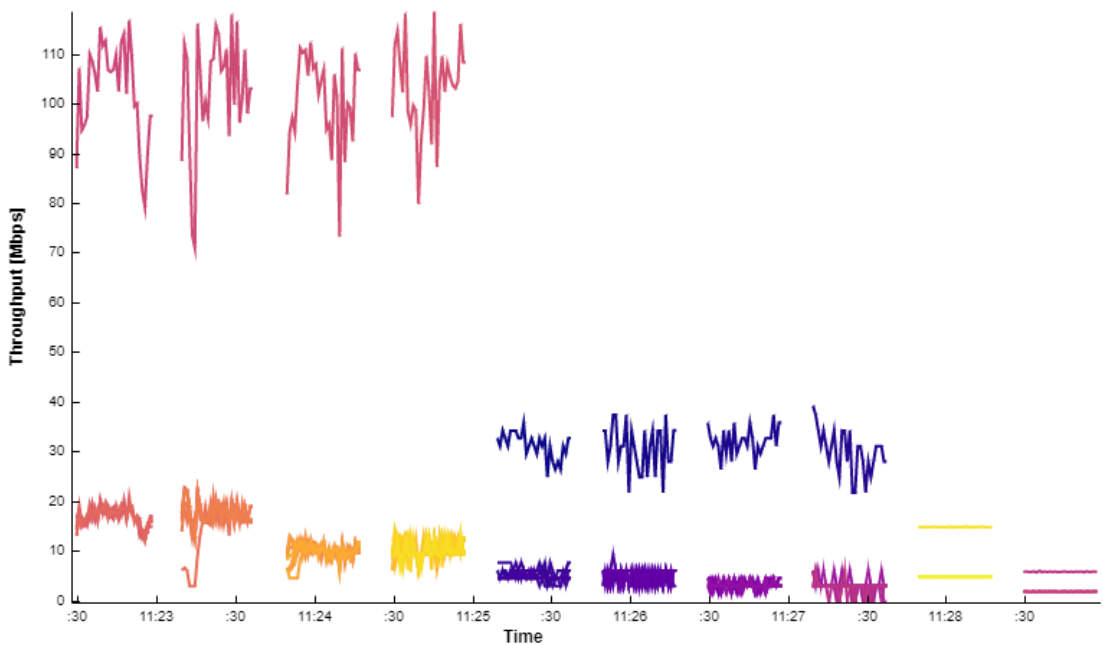


# A. Přílohy

## A.1 Ukázky z webového rozhraní F-Testeru 5G



Obrázek A.1: Úvodní obrazovka webového rozhraní F-Testeru 5G.



Obrázek A.2: Příklad vygenerovaného grafu z F-Testeru 5G (zkušební testy).

## A.2 Naměřená data vygenerovaná F-Testerem

K bakalářské práci je přiložena složka s naměřenými daty. Složka obsahuje tři podložky s názvy měřených dnů (`pondeli`, `streda` a `nedele`) a podložku se zkušebními testy (`zkusebni_testy`). Tyto podsložky obsahují soubory `.pdf` a `.csv`. Soubory `.pdf` zahrnují zprávu o měření a soubory `.csv` všechna naměřená data.