

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



## Ověřování parametrů mobilních datových služeb

Ondřej Vaník

**Vedoucí práce:**

**Ing. Tomáš Zeman, Ph.D.**

**Externí vedoucí práce:**

**Ing. Jan Hrušovský**

květen 2018

## **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.

Datum:

.....

podpis bakalanta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Tomášovi Zemanovi Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Hrušovskému ze společnosti O2 Czech Republic a. s. za pomoc při vybírání jednotlivých lokalit, cenné rady a poskytnutí některých důvěrných dokumentů společnosti O2 Czech Republic a. s. Poté bych chtěl poděkovat Tomášovi Kobesovi ze společnosti O2 Czech Republic a. s. za poskytnutí mobilního měřicího terminálu, manuál k aplikaci QualiPoc a pomoc při zpracování grafů z měření. Nakonec bych rád poděkoval svým rodičům, kteří mě po celou dobu tvorby bakalářské práce podporovali.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaník** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **457161**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Multimediální technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Ověřování parametrů mobilních datových služeb**

Název bakalářské práce anglicky:

**Verification of mobile data services parameters**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je ověřování vybraných kvalitativních parametrů mobilních datových služeb v místech s významnou, ale krátkodobou koncentrací uživatelů.

Určete místa, která jsou kritická z pohledu investice do kapacity sítí. Na příkladech ověřte míru a rozsah případné degradace služeb. Popište modely chování zákazníků v těchto lokalitách a časech. Navrhněte řešení pro období následujících 2-3 let z pohledu rentability a z pohledu zákaznické spokojenosti.

Seznam doporučené literatury:

[1] ICT STATISTICS. ITU [online]. Geneve: ITU, 2017 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z:  
<http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/default.aspx>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Tomáš Zeman, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **23.01.2018**

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

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Tomáš Zeman, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
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

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá ověřováním rychlosti přenosu dat analýzou v mobilní síti operátora O2 Czech Republic a. s. v různých místech při různých situacích. Místa a situace byla vybírána s ohledem na předpokládanou (systematickou či nahodilou) zvýšenou potřebu datového provozu. Cílem této práce je ověřit rychlost datového přenosu a poté navrhnout místa, kde by bylo vhodné investovat prostředky na zvýšení kapacit z hlediska datového provozu.

Práce je rozdělena na dvě části: teoretickou a praktickou. První část je zaměřena na přehled vlastností jednotlivých generací mobilních sítí, které se v současné době využívají, ale zároveň je v práci i náhled do budoucnosti mobilních sítí. Ve druhé části práce je navržena metodika, průběh a vyhodnocení měření s doporučením na možná vylepšení.

**Klíčová slova:** síť, přenos, generace, mobilní síť, měření, data, vlakové soupravy, rychlost přenosu mobilních dat, mobilní zařízení, architektura sítě, lokality, Česká republika, doprava

# Abstract

This bachelor thesis deals with speed verification analysis of mobile data in the network of company O2 Czech Republic a. s. in different locations and different situations. The locations and situations were chosen considering the expected (systematic or random) higher need of data traffic. The objective of this work is to verify the speed of data transfer and then suggest places, where it would be appropriate to invest money to boost the capacity in terms of data traffic.

The bachelor thesis is divided into two parts: theoretical and practical. The first part is focused on the overview of individual generations of mobile network, which are used these days, but simultaneously there is a preview of the future mobile network in this bachelor thesis. In the second part there is designed methodics, process and evaluation of the measurement with a recommendation to possible improvement.

**Index terms:** network, transfer, generations, mobile network, measurment, data, train sets, mobile data transfer speed, mobile device, network architecture, locations, Czech Republic, traffic

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Mobilní sítě</b> .....	<b>2</b>
2.1 1. generace mobilních sítí .....	2
2.2 Buňkový systém .....	3
2.3 Metody vícenásobného přístupu .....	4
<b>3 GSM</b> .....	<b>6</b>
3.1 Architektura sítě .....	6
3.2 Telekomunikační služby GSM .....	7
3.3 HSCSD .....	8
3.4 GPRS .....	8
3.5 EDGE .....	9
3.6 Pokrytí .....	10
<b>4 UMTS</b> .....	<b>11</b>
4.1 Vývoj 3G .....	11
4.2 Architektura sítě .....	12
4.3 Služby a využití v současnosti .....	13
<b>5 LTE-A</b> .....	<b>14</b>
5.1 Vývoj LTE .....	14
5.2 Architektura sítě .....	15
5.3 Služby a aplikace .....	17
5.4 4.5G .....	18
<b>6 Budoucnost s 5G sítí</b> .....	<b>19</b>
6.1 Služby .....	19

<b>6.2 Systém zabezpečení .....</b>	<b>21</b>
<b>7 Měření kvality datového přenosu .....</b>	<b>23</b>
<b>7.1 Metodika měření .....</b>	<b>26</b>
7.1.1 Výběr lokalit .....	26
7.1.2 Aplikace QualiPoc.....	29
<b>7.2 Průběh měření .....</b>	<b>32</b>
<b>7.3 Dílčí výsledky .....</b>	<b>35</b>
7.3.1 Vyhodnocení měřených míst .....	35
7.3.2 Návrh míst na posílení signálu .....	47
<b>8 Závěr.....</b>	<b>50</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>52</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>53</b>

# 1 Úvod

Chytrá mobilní zařízení a s tím spojený internet v mobilu se staly v posledních letech fenoménem společnosti. V současné době evidujeme celosvětově velký nárůst uživatelů mobilního internetu a jejich počet stále roste.

Na český trh vstupuje první operátor v roce 1991. Společnost Eurotel tehdy vybudovala mobilní síť NMT a začala nabízet radiotelefony. Pokrytí v té době bylo převážně jen ve větších městech a vzhledem k tomu, že zatím neexistovaly SIM karty, tak mobilní zařízení sloužila pouze k telefonování. V té době se ceny mobilních zařízení pohybovaly v cenové relaci vyšší, než „vlajkové lodě“ současných nejznámějších výrobních společností a tarify volání od operátora Eurotel byly kdysi mnohem dražší, než dnes (přibližně 10 x více). V roce 1995 využívalo mobilního telefonování přibližně 30 000 zákazníků.

V současnosti je v České republice okolo 14 miliónů aktivních SIM karet a uživatelů mobilního internetu přibližně 60 % české populace. S pokrokem technologie požadují uživatelé od operátorů stále vyšší rychlost přenosu dat a zároveň pokrytí signálem na ideálně všech místech po České republice. V této zemi je v současnosti evidováno přes 100 mobilních operátorů, z nichž přes 90 % uživatelů využívá 3 operátory: O2, T-Mobile a Vodafone.

Tato práce vznikla ve spolupráci se společností O2 Czech Republic a. s. Úkolem bylo analyzovat vybraná riziková místa s předpokládaným poklesem rychlosti přenosu dat nebo výpadku signálu. K tomu jsem měl k dispozici služební mobilní měřicí terminál, který obsahoval speciální aplikaci k měření všech potřebných parametrů. Všechna data byla změřena za účelem ověření a případného návrhu míst na zvýšení rychlosti mobilní sítě.



## 2 Mobilní sítě

K již přes století zavedené pevné síti se v druhé polovině 20. století přidává síť mobilní, která funguje na rozdíl od pevné sítě na principu rádiových vln. Rádiový přenos probíhá na základě elektromagnetických vln, které se šíří efektivně v daném frekvenčním pásmu. Se zvyšující frekvencí jsou vlny kratší, což se týká právě mobilních sítí, které se vyskytují v pásmu ultra krátkých vln v rozmezí stovek MHz až jednotek GHz.

Mobilní síť umožňuje plošné poskytování služeb a od 2. generace mobilních sítí má velký význam při digitalizaci. Jedná se o bezdrátovou technologii, pomocí které může uživatel přenášet hlas, data či videa ve formě datového toku vysokou rychlostí přenosu dat. Široké využití se nabízí v oblastech s obtížným přístupem, kde se z ekonomického hlediska nevyplatí budovat kabelové rozvody. (1)

### 2.1 1. generace mobilních sítí

Úplné zárodky mobilních radiotelefonních sítí vznikají v 70. letech 20. století v Československu. Tyto sítě pod názvem AMR (*Automatizovaný městský radiotelefon*) byly vyráběny v pardubické Tesle a jednalo se o první síť v rámci východního bloku. Účastník hovoru musel být lokalizován pomocí ústředního telefonního obvodu (UTO). Na jeden UTO bylo přiřazeno přibližně 80 čísel, z nichž čtyřmi se mohlo volat aktivně a čtyřmi pasivně. Provoz této sítě skončil v roce 1995.

Další typy mobilních sítí vznikají v 80. letech 20. století ve Skandinávii. Tyto sítě se soustředily na analogový přenos hlasu a samotná data prozatím nepřenášely. Právě ve Skandinávii se používaly systémy NMT (*Nordic Mobile Telecommunication*), které fungují na principu frekvenční dělení FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) a frekvenční modulace FM (*Frequency Modulation*). Tyto systémy využívají pásmo 450 nebo 900 MHz na rádiovém rozhraní frekvencí a jejich výhodou oproti ostatním systémům první generace je, že umožňují mezinárodní roaming. V České Republice začal poprvé využívat systém NMT Eurotel v roce 1991.

V USA nebo Jižní Americe se používaly systémy AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), které se od NMT lišily tím, že pracovaly ve frekvenčním pásmu 800 MHz.

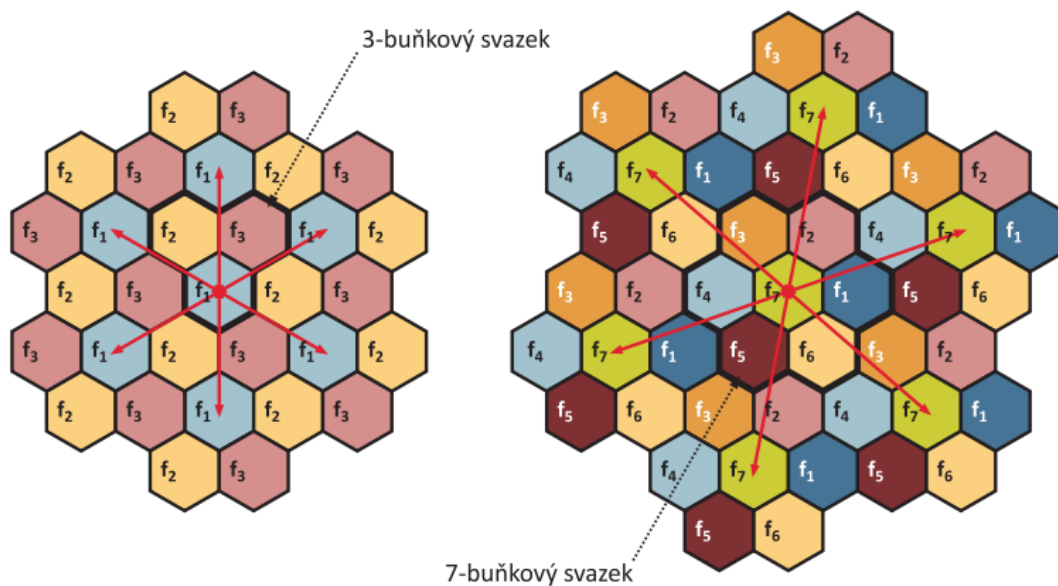
Celá první generace byla dnes zcela nahrazena modernějšími digitalizovanými sítěmi, které jsou rychlejší, přesnější a spolehlivější.

## 2.2 Buňkový systém

Již od roku 1946 se pro mobilní komunikaci využívá buňkový systém. Tento systém, skládající se z pevných základnových stanic BTS (*Base Transceiver Station*) a mobilních stanic MS (*Mobile Station*), slouží k efektivní komunikaci mezi mobily. Oproti jiným řešením jsou buňky flexibilnější, pro přenos je zapotřebí menšího výkonu a zároveň se přenáší vyšší kapacita dat. Velkou výhodou buněk je možnost mnohonásobného využití stejné přidělené frekvence v obsluhované oblasti a použití handoveru neboli rychlého automatického přepojení základnové stanice pro mobilní zařízení při přesunu z jedné buňky do druhé.

Buňky tvoří dohromady clustery, což jsou svazky po několika šestiúhelníkových buňkách. Jak si lze všimnout z obr. 1, svazků může být neomezené množství a bývají obvykle se třemi nebo sedmi frekvencemi. Ve svazku se mohou použít stejné frekvence za podmínky, že se oblast tří či sedmi buněk přibližně rovná interferenci zóny. (2) (3)

Jednotlivé buňky se liší svojí velikostí. Rozlišujeme základní 3 typy buněk: makrobuňky, mikrobuňky a pikobuňky. Makrobuňky jsou nejpoužívanějším typem a jejich použití je zejména v celulárních sítích na pokrytí velkého území v méně obydlených oblastech. Jedná se obvykle o 3 vysílače, kdy každý vyzařuje úhlem  $120^\circ$ . Oproti tomu mikrobuňky jsou vysílače, které jsou hojně používané v městských zástavbách, kde dochází k větší difrakci a signály se nešíří příliš přímočaře. Vysílač je všesměrový (vyzařuje do všech směrů stejně) a využívá se především pro vykrytí problémovějších částí. Nejnižší dosah mají pikobuňky, jejichž základnové stanice jsou instalovány obvykle v kancelářích pro vylepšení dostupnosti signálu.



Obr. 1: Obsluhovaná oblast rozdělena do svazků (clusterů) a buněk

	makrobuňka	mikrobuňka	pikobuňka
dosah [m]	2000-35000	200-2000	4-200

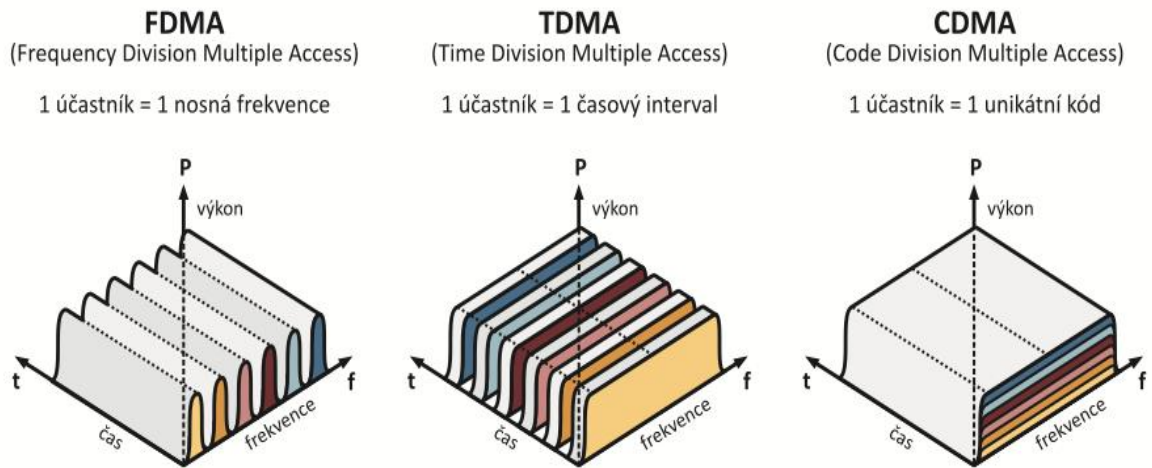
Tab. 1: Dosahy jednotlivých buněk v obsluhované oblasti

### 2.3 Metody vícenásobného přístupu

V praxi se počítá s tím, že je k jedné základnové stanici naráz připojeno více mobilních zařízení. Zároveň musí být zajištěno, aby zároveň probíhala komunikace mezi základnovou stanicí a více mobilními zařízeními. K tomu slouží metody vícenásobného přístupu.

Při určitém vyhrazeném frekvenčním pásmu lze použít 3 základní možnosti přístupu: TDMA, FDMA a CDMA. U TDMA (*Time Division Multiple Access*) dochází k rozdělení pásma do časových subpásem. Každý uživatel má své malé subpásmo, ve kterém vysílá. Pomocí metody FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) je přidělováno každému uživateli vlastní malé frekvenční subpásmo, které vzniká rozdělením celého frekvenčního pásma. U metody CDMA (*Code Division Multiple Access*) dochází k zakódování dat dle dané předlohy, která se liší od ostatních kódovacích předpisů ostatních kanálů. U přijímacího zařízení následně dojde k rozkódování podle stejného vzoru, jako byly data kódovány. Výhodou této metody je přenos všech informací v jednom frekvenčním pásmu a bez nutnosti časového dělení.

Často se lze v praxi setkat i s kombinacemi metod vícenásobného přístupu. Jednou z nich je OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), což je kombinace časového a frekvenčního dělení. Dochází k rozdělení zdrojů jak do frekvenčních subpásem, tak do časových subpásem a každý uživatel využije při přenosu více subnosných. Používá se například pro downlink u LTE. (2)



Obr. 2: Přístupové metody

## 3 GSM

V průběhu 90. let vznikají první sítě využívající digitálního přenosu. S přechodem z analogového na digitální přenos vzniká druhá generace mobilních sítí s označením 2G. Tento nový systém měl za úkol výrazně zrychlit a zjednodušit hovory a nově umožnit přenos dat. Jednotlivé technologie jsou rozděleny do standardů založených na TDMA či CDMA.

Celosvětově se využívá systém GSM (*Global System for Mobile Communication*), který pochází z Evropy a je založen na časovém dělení. Představuje soubor malých buněk, v nichž pracují základnové stanice BTS. Mobilní zařízení jsou připojeny k nejbližší BTS a při přechodu do jiné buňky dochází se zpožděním v rámci milisekund k automatickému přepojení (Handover). Další změnou oproti předchozí generaci je zavedení nového systému identifikace účastníka pomocí SIM karty. Karta mimo jiné obsahuje identifikační číslo účastníka, ověřovací klíč nebo udává informace o předplacených službách. (2)

GSM sítě využívají základní 3 standardy, které se liší použitými kanály a frekvenčním pásmem. Tyto standardy jsou zobrazeny v tab. 2. Pásmo 1800 MHz se používá na evropském kontinentu, zatímco pásmo 1900 MHz je využíváno například v USA.

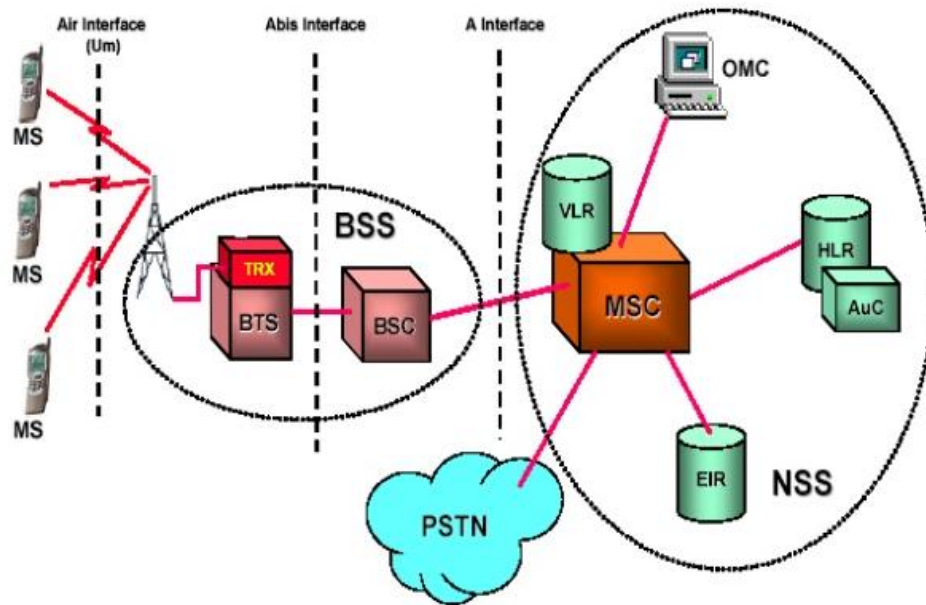
standardy	pásmo [MHz]	počet kanálů	šířka pásma [MHz]
GSM 900	900	max. 2x124	2x25
GSM 1800	1800	max. 2x374	2x75
GSM 1900	1900	max. 2x298	2x75

Tab. 2: Standardy sítí GSM

### 3.1 Architektura sítě

Jelikož byl tento systém vyvinut především pro přenášení hovorů, je architektura sítě poměrně jednoduchá a skládá se ze dvou hlavních částí: přístupové a páteřní sítě. Přístupová síť umožňuje účastníkovi přístup do telekomunikační sítě a skládá se ze základnových stanic, mobilních stanic a ovladačů základnových stanic BSC (*Base Station Controller*), které spravují několik BTS a zároveň je řídí.

## GSM Architecture Overview



Obr. 3: Architektura sítě GSM

Páteřní síť vzájemně propojuje účastníky komunikace. Hovor jdoucí z BSC přijímá ústřednová stanice MSC (*Mobile Switch Center*), kde je pomocí registru telefonních čísel a mobilních stanic volající uživatel přepojen k cílové přípojce.

### 3.2 Telekomunikační služby GSM

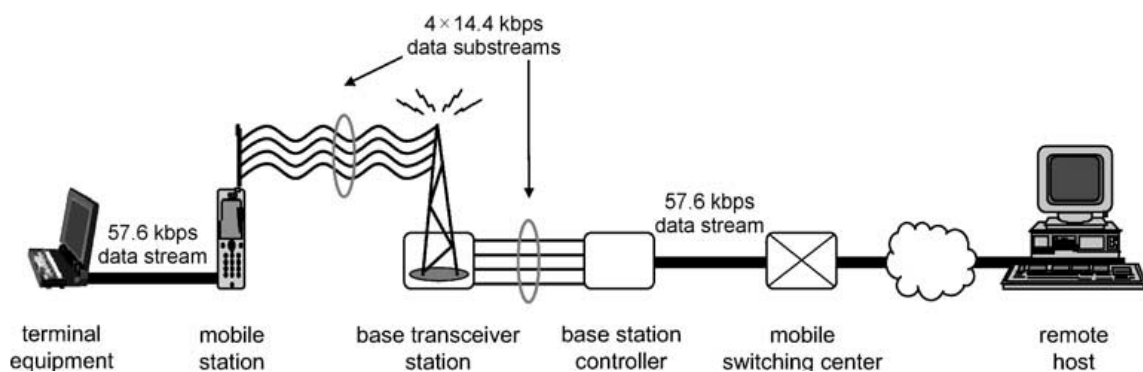
Tento systém má oproti systémům první generace řadu výhod. Vyznačuje se vyšší kapacitou, díky kvalitnímu systému kódování a modulace vykazuje vysokou odolnost proti odposlechu a rušení, nebo snazší realizaci mezinárodního roamingu.

Hlavní službou 2. generace mobilních sítí je telefonie neboli obousměrný (duplexní) přenos hovorového signálu na velkou vzdálenost v reálném čase. Telefonie zahrnuje i tísňové nebo mezinárodní volání. Další službou je možnost odesílání krátkých textových zpráv SMS, kdy lze odeslat zprávu o délce až 160 znaků mezi dvěma uživateli. S touto službou souvisí i možnost současného odeslání zpráv všem mobilním zařízeními v rámci jedné buňky CBS (*Cell Broadcast Service*), což se používá například při nenadálých událostech. Mezi další nově poskytované služby se řadí elektronická pošta (e-mail), bankovní nebo informační služby. Duplexní přenos dat je zajištěn synchronně nebo asynchronně. Obě přenosové služby dosahují přenosové rychlosti při použití všech modulací maximálně 3700 bit/s. (2)

### 3.3 HSCSD

S vývojem doby přestávala 2G technologie v podobě GSM zaostávat především v rychlosti přenosu dat. Uživatelé byli omezoováni pouze na rychlosti 10 kbit/s. Mobilní operátoři se tedy snažili o vývoj nové, rychlejší sítě, kdy bylo nutné zachovat 2G přenos hlasu při zvýšení datového přenosu.

Nejprve se zvyšuje rychlosti přenosu dat až na 14,4 kbit/s snížením redundantní informace ve zprávě a omezením robustního ochranného mechanismu. K výraznějšímu zvýšení rychlosti dochází až u systémů takzvané 2.5G generace.

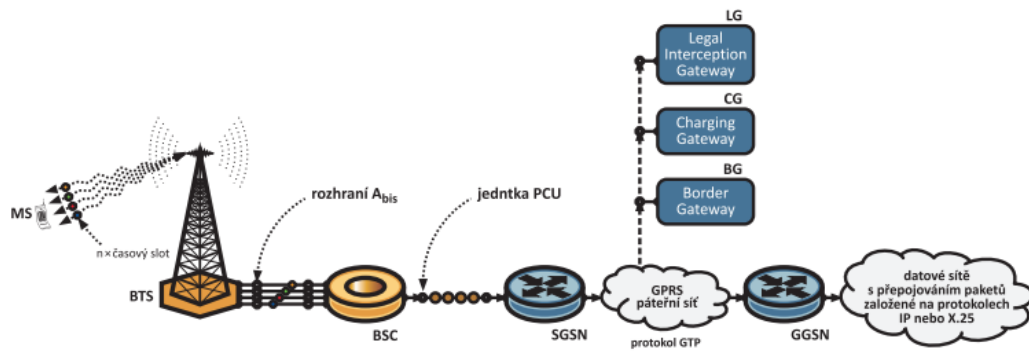


Obr. 4: Princip technologie HSCSD

Jednou z metod zvýšení přenosu dat je přepojování okruhů HSCSD (*High Speed Circuit Switched Data*), čímž se zvýší rychlost až na 115 kbit/s. Rychlost je zvýšena využitím více časových intervalů mezi mobilním terminálem a základnovou stanicí ve stejnou dobu. Časové sloty jsou přidělovány každé stanici různě v závislosti na aktuálním počtu dostupných kanálů. Způsob přenosu je asymetrický. Obvykle bývá přiděleno více slotů směrem k mobilnímu zařízení, než směrem k základnové stanici. Děje se tak například při používání downlinku u mobilního zařízení. (1),(2)

### 3.4 GPRS

V roce 2001 přišla po HSCSD další nová technologie, která přinesla rozšíření 2G sítě opět o další způsob datového přenosu. Jde o novou síť pod názvem GPRS (*General Packet Radio Service*), která funguje na principu přepojování paketů a zvyšuje rychlost přenosu dat až na 171 kbit/s. Data jsou posílána po menších částech (pakety, ethernetové rámce). Každá část nese informaci o cíli své cesty a je doručována samostatně po odlišné cestě. Původní zprávu sestaví obvykle až samotný příjemce.



Obr. 5: Princip technologie GPRS

Tato technologie využívá nově v okruhu datový uzel SGSN, který slouží ke komunikaci s rádiovou částí GPRS a datovou bránu GGSN a plní funkci směrovače. Pomocí APN (*Access Point Name*) má uživatel přístup do předem definovaných sítí, čímž může operátor přesně koordinovat skupiny uživatelů podle jejich zaplacených služeb. Operátor tak může vytvářet privátní či veřejné datové sítě dle vlastní potřeby.

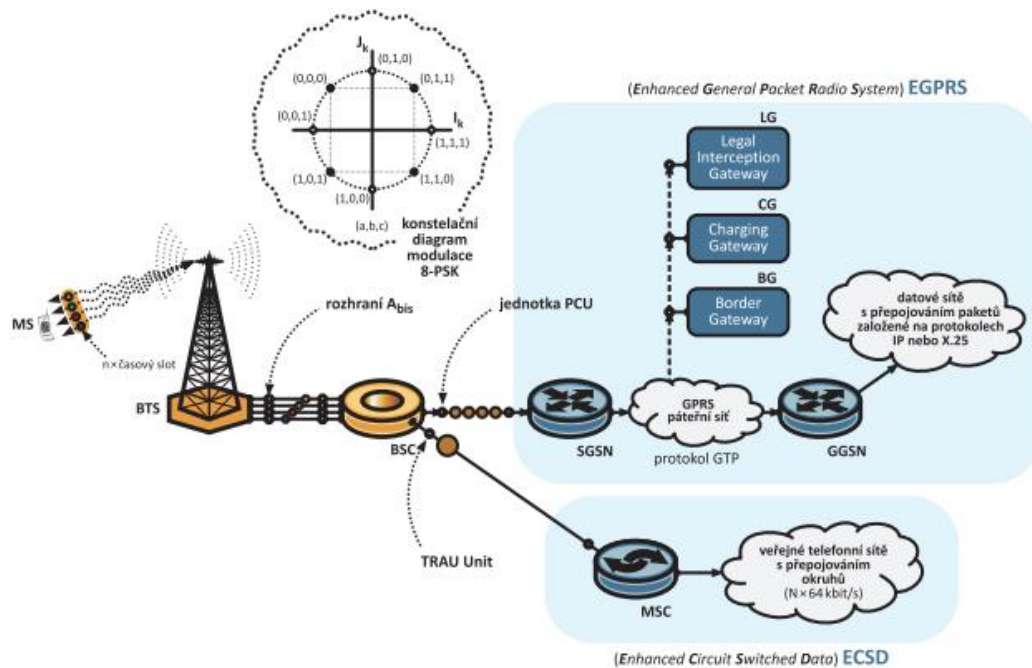
Výhodou tohoto systému je možnost použití alternativních cest v případě výpadku některého spoje. Tento systém byl vytvořen za účelem možnosti trvalého připojení k internetu a zároveň se snížily ceny mobilních dat, kdy se nově účtují ceny za určité časové období například měsíčně.

### 3.5 EDGE

Další vylepšování a zrychlování 2G sítě přinesl systém EDGE (*Enhanced Data for GSM Evolution*), který se používá dodnes a je finálním stádiem vývoje GSM. Tento systém navazuje na předchozí technologie HSCSD a GPRS a je považován za síť 2.75G. Oproti původní 2G verzi dochází k navýšení kapacity a rychlosti sítě.

V EDGE se oproti GSM používá jiný způsob modulace 8-PSK (*Phase Shift Keying*), což má výhodu ve větší celkové přenosové rychlosti, která tak dosahuje až 473,6 kbit/s. 8stavová fázová modulace umožňuje přenesení 3 informačních bitů pomocí jednoho symbolu na rádiové vrstvě, oproti 1 informačnímu bitu, který přenášely minulé verze 2G v rámci modulace GMSK (*Gaussian minimum Shift Keying*).





Obr. 6: Princip technologie EDGE

System EDGE je v praxi nutné instalovat na jednotlivé BTS v podobě nového typu transceiveru. V České republice je EDGE nainstalován na většině BTS operátorů, a proto se s ním můžeme setkat na všech místech, kde je signál operátora.

### 3.6 Pokrytí

Druhá generace v podobě GSM má pokrytí téměř na celém území České republiky. V dnešní době se využívá pouze u hovorových služeb, jelikož maximální přenosová rychlost je pouze 20 kbit/s. Přenosová rychlost je oproti novějším generacím téměř zanedbatelná, a proto se GSM již téměř nevyužívá. Používá se především v místech, kde se není možné připojit k síti 4G. Jedná se o málo využívané lokality především na opuštěných místech v přírodě nebo například v chatařských oblastech.

## 4 UMTS

Druhá generace sítí klade důraz především na stabilní přenos hlasu pomocí rádiových vln. Problémem zůstává pomalý přenos dat, který nestačí na neustále se vyvíjející aplikace, které jsou náročné jak na přenosovou kapacitu, tak kvalitu služby.

V důsledku pokroku se začala koncem minulého století vyvíjet nová generace mobilních sítí. V rámci vývoje vznikla nová skupina pod označením 3GPP (*Third Generation Partnership Project*). Jejich cílem bylo vytvořit nový standard 3G, který bývá často označován jako UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*).

### 4.1 Vývoj 3G

Vývoj UMTS začíná v roce 1999 vydáním verze Release 99. Tento systém je plně kompatibilní s GSM a pracuje v pásmu 2 GHz. Přidělená kmitočtová pásma záleží především na tom, jestli UMTS pracuje v časovém duplexu TDD (*Time Division Duplex*) nebo frekvenčním duplexu FDD (*Frequency Division Duplex*).

Typ duplexu	downstream [Mhz]	upstream [Mhz]
FDD	2110-2170	1920-1980
TDD	2010-2025	1900-1920

Tab. 3: Přidělená kmitočtová pásma při časovém a frekvenčním duplexu u UMTS

Další změnou oproti sítím 2G je přístup založený na WCDMA, který nahrazuje TDMA a FDMA. Liší se tím, že WCDMA používá stejné pásmo ve všech buňkách tak, že se buňky vzájemně neruší. Tento nový přístup se používá na úkor CDMA, jelikož využívá mnohem širší pásmo pro informační bity uživatelů. Z tohoto důvodu je u WCDMA vyšší kapacita systému a s tím i související vyšší celková rychlost.

V průběhu let vznikají nové vylepšující verze UMTS. V roce 2001 vzniká Release 4, který upravuje především páteřní síť. Hlavní změnu představuje oddělení uživatelských dat a kontrolních informací v CS (*Circuit Switched*) a definování nových rozhraní umožňujících zavedení subsystémů IMS (*IP Multimedia Subsystem*). Další verze Release 5 přináší možnost vysokorychlostních přenosů (až 11,4 Mbit/s) ve směru k uživateli. Tyto přenosy označujeme jako HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*). Naopak Release 6 přináší zvýšení rychlosti ve směru od uživatele až na 5,76

Mbit/s pomocí tzv. HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*). Poslední standard Release 7 přináší opět zvýšení přenosových rychlostí v obou směrech přenosu pomocí zavedení nové modulace 64-QAM. Zrychlení je také způsobeno použitím techniky MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), kdy používáme většího množství antén jak na vysílači, tak přijímači. Maximální rychlosti tedy jsou ve směru k uživateli 42 Mbit/s a v opačném směru 11,5 Mbit/s. (2)

## 4.2 Architektura sítě

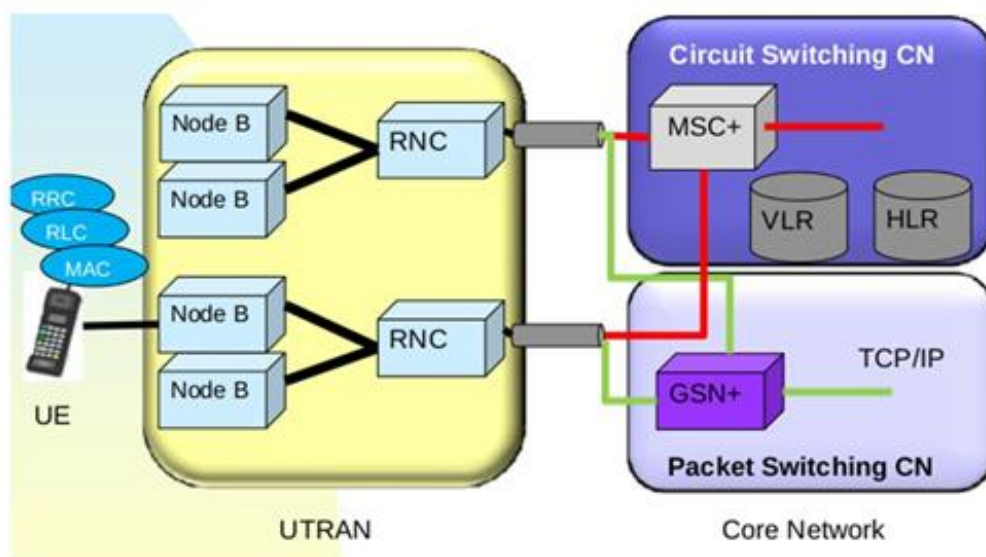
UMTS síť se skládá celkem ze tří základních částí: UE, UTRAN a CN.

UE (*User Equipment*) obsahuje mobilní terminál, který má na starost komunikaci na rozhraní Uu a USIM (*UMTS Subscriber Identity Module*), což je karta obsahující veškeré informace o uživateli. Funkce je stejná jako u karty SIM v 2G.

Druhá část UTRAN (*UMTS Universal Radio Access Networks*) byla definována poprvé v Release 99. Jedná se o nový typ rádiové přístupové sítě, která se skládá ze dvou síťových prvků. Prvním prvkem je základnová stanice NodeB, což je náhradou za BTS v síti 2G. Skládá se ze stožáru vysílací/přijímací antény a potřebného hardwaru. NodeB umožňuje připojení uživatele k rádiové síti a další přenos v síti. Několik stanic NodeB se připojuje k jedné RNC (*Radio Network Controller*), což je druhý síťový prvek v rámci UTRAN. RNC je obdobou BSC u 2G a jejich funkce jsou podobné. Obě nesou odpovědnost za rádiové zdroje, avšak RNC je odpovědnější za pohyb uživatelů a řízení jednotlivých bloků.

Třetí část představuje páteřní síť CN (*Core Network*), která je rozdělena na okruhově přepínanou část CS (*Circuit Switched*) a paketově přepínanou část PS (*Packed Switched*). Funkce je stejná jako u sítě 2G, akorát dochází k rozšíření zabezpečení a řízení mobility je nově v části UTRAN.

# UMTS Architecture



Obr. 7: Architektura sítě UMTS

## 4.3 Služby a využití v současnosti

3G sítě jsou schopné sjednotit různé bezdrátové přístupové technologie současnosti do jedné pružné a výkonné infrastruktury, která může nabídnout široký rozsah multimediálních služeb s garantovanou kvalitou. Na rozdíl od předešlých systémů tedy umožňuje například videokonference o rychlosti 384 kbit/s s plnou mobilitou a až 2 Mbit/s s omezenou mobilitou (do 10 km/h) v základním Release 99. Mimo jiné umožňuje jako první síť mezinárodní handover nebo od Release 5 jsou podporovány online hry vyžadující vysokou přenosovou rychlost a nízké zpoždění.

V současné době se stává tento systém méně využívaný a předpokládá se, že v horizontu několika let zcela vymizí. Důvodem je nejnovější 4G síť, která umí vše, co nabízí 3G síť a pokrytí je v současnosti v podstatě srovnatelné. Na místech s horším pokrytím se bude používat i nadále síť 2G s technologií EDGE.

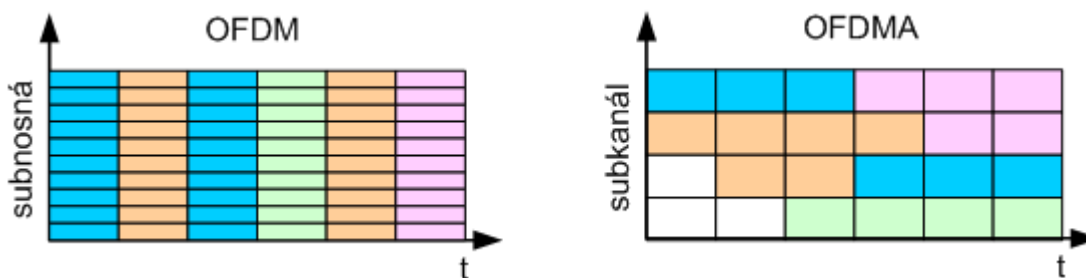
## 5 LTE-A

Mezistupněm mezi třetí a čtvrtou generací je síť LTE (*Long Term Evolution*), která je revoluční vysokorychlostní síť. S touto novou technologií přichází ve vydání standardu Release 8 a 9 skupina 3GPP, která stála i za vývojem předchozích 3G sítí. Hlavní výhodou LTE oproti předchozí verzi je opět mnohonásobně vyšší rychlost jak ve směru stahování (172,8 Mbit/s), tak nahrávání (57,6 Mbit/s) při šířce kanálu 20 MHz. LTE také přináší nižší latenci (zpoždění).

### 5.1 Vývoj LTE

Vydání standardu Release 8 popisuje novou technologii přístupu OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), ve směru k uživateli a SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency Division Multiple Access*) ve směru od uživatele. Nahrazuje tak přístup WCDMA používaný u UMTS.

Přístup OFDMA pracuje s velkým množstvím subnosných, které jsou děleny do skupin (subkanálů). Od OFDM se liší tím, že jsou jednotlivé subnosné tvořící subkanály rozprostřeny po celém pásmu, zatímco v případě OFDM musí jednotlivé subnosné v subkanálech k sobě přiléhat. Výhodou je, že v případě rozprostření můžeme použít takovou modulaci, která zvýší rychlost přenosu. Zároveň je tato technologie úspornější z důvodu vysílání s různým výkonem. (4)



Obr. 8: Rozdíl mezi OFDM a OFDMA

Druhou modulační technikou, která se využívá v LTE, je SC-FDMA. Tato technika se liší od OFDMA tím, že se vstupní bity k vytvoření signálu posílají přes všechny subnosné. Dosahuje se tak aplikací Fourierovy transformace (FFT) na vstupní bity, čímž vzniknou data použitá k vytvoření subnosných. Následně jsou data stejně jako v případě OFDM převedena pomocí inverzní Fourierovy transformace (IFFT) z frekvenční oblasti do časové. SC-FDMA je náročnější než OFDMA z důvodu většího množství početních

operací při zpracování bitů, avšak díky snížení poměru špičkového a průměrného výkonu PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) dochází k prodloužení životnosti baterie a zároveň k menšímu rušení sítě. (4)

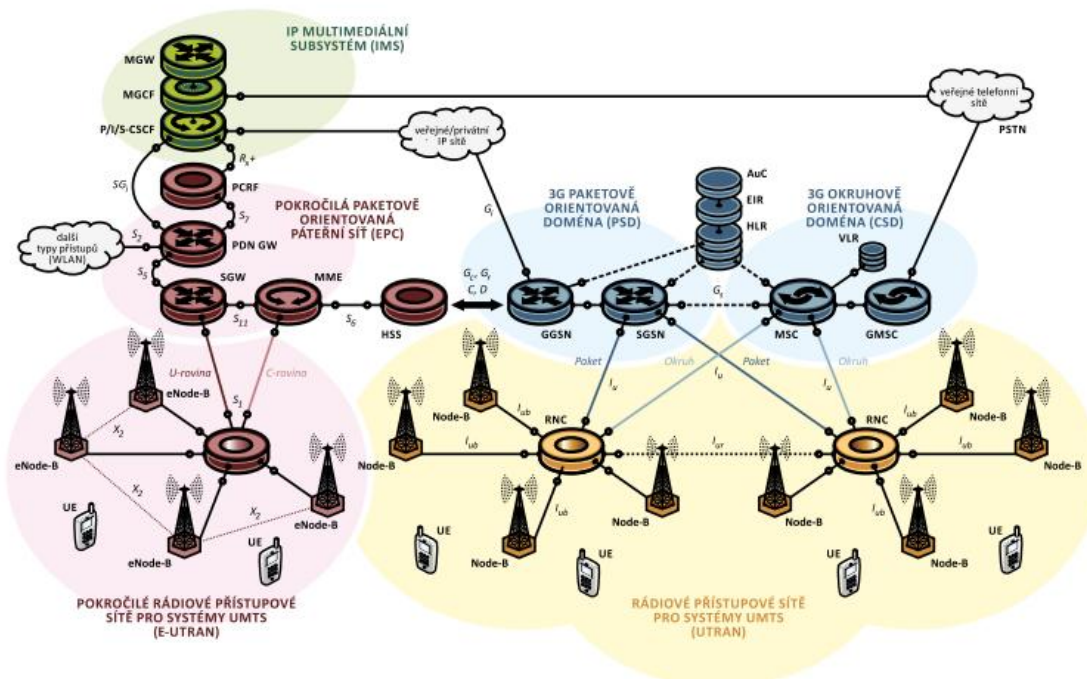
Release 9 přináší nové prvky do síťové architektury (viz. 5.2). Dále zavádí multimediální a multicastové služby MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Services*) a dochází k rozšíření lokalizačních služeb LBS (*Location Based Services*). (2)

V roce 2011 je skupinou 3GPP vydán nový standard Release 10, který je považován za první verzi mobilních sítí 4. generace. Do 4. generace mobilních sítí tedy již patří LTE-A (*LTE-Advanced*), která se od roku 2015 objevuje u všech tuzemských operátorů, a to především v Praze a dalších větších městech.

Jednou z novinek této verze je možnost spojování signálů z několika frekvenčních pásem dohromady (*carrier aggregation*), čímž se dají násobit rychlosti přenosu. Tato síť dosahuje maximální rychlosti až 450 Mbit/s při spojení dvou pásem nebo až 600 Mbit/s při spojení tří pásem. Rozdíl v rychlosti oproti minulé verzi je přibližně třikrát nebo čtyřikrát v závislosti na počtu spojení pásem. Důležitou změnou je také přidání technologie MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) ve směru od uživatele i ve směru k uživateli v omezené míře. MIMO, jak již název vypovídá, umožňuje vícecestné šíření díky více vstupům a výstupům a tím i rychlejší šíření dat. Mezi další nové techniky patří například podpora retranslačních stanic nebo omezení mezibuňkové interference, díky správné implementaci femtobuněk. (2)

## **5.2 Architektura sítě**

Architektura 4G sítě vychází z předchozích generací GSM a UMTS. Základní bloky jsou E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Access Network*) tvořící přístupovou část a EPC (*Evolve Packet Core*) tvořící jádro sítě. U UMTS architektury jsou dle obr. 9 další bloky UTRAN (*UMTS Terrestrial Access Network*), PS (*Packet System*) a CS (*Circuit System*), pomocí kterých dochází k připojení k veřejným nebo privátním datovým a telefonním sítím. (5)



Obr. 9: Podrobná architektura sítě LTE

Z obr. 9 je zřejmé, že se přístupová část sítě skládá ze základnových stanic eNodeB, které mají řadu funkcí. Základnové stanice například řídí mobilitu uživatelů, přidělování rádiových prostředků, šifrují data nebo navrhují přenos dat ve směru jak k uživateli, tak od uživatele. Výhodou těchto základnových stanic je, že jejich uzly jsou přímo připojeny k síťové infrastruktuře, což má za následek plynulejší provoz sítě a zároveň dochází k zvýšení výkonu síťového rozhraní. (2), (5)

Jádro sítě EPC se skládá z několika funkčních bloků. Prvním z nich je blok MME (*Mobility Management Entity*), který řídí veškerou signalizaci mezi účastníkem a jádrem sítě. MME zajišťuje bezpečný přenos dat mezi uživatelem a sítí použitím autentifikace, autorizace nebo šifrování dat. Na MME je napojen blok HSS (*Home Subscriber Server*), který slouží jako databáze uživatelů. V tomto bloku dochází k identifikaci uživatele a následnému zjištění stavu jeho zaplacených služeb. Blok S-GW (*Serving Gateway*) je prvním blokem ve směru od E-UTRAN. Tento blok slouží ke směrování a přeposílání paketů ve směru od a k uživateli a zodpovídá za mobilitu paketů. Blok PDN-GW (*Packet Data Network Gateway*) navazuje na S-GW a využívá se ve spojení s kvalitou služeb, dochází k filtrování paketů a řízení toku dat. Na tento blok navazuje server PCRF (*Policy Control and Charging Rules Function*) sloužící k účtování služeb a zároveň zjišťuje, jestli jsou dodržena všechna pravidla přenosu. (2), (5)

### 5.3 Služby a aplikace

Z důvodu velkého navýšení rychlosti a nových technologií, které LTE přineslo, došlo i k rozvoji v oblasti služeb a aplikací. Čtvrtá generace mobilních sítí taktéž umožňuje spuštění několika aplikací zároveň a například u videohovorů dochází ke snížení zpoždění obrazu i zvuku.

Jednotlivé aplikace ale mají různé požadavky, které je nutno rozlišit. Proto se zavádí QCI (*QoS Class Identifier*) neboli identifikátor třídy QoS. Celkově je definováno 9 tříd QCI, přičemž má každá třída 4 různé parametry. Jedním z parametrů je garantovaná přenosová rychlost GBR (*Guaranteed Bit Rate*) používající se například pro hovor. Vždy se určuje, je-li přenosová rychlost zaručena, či nikoliv (Non-GBR). V případě garance dochází k přidělení daného množství rádiových zdrojů, načež se nemusí žádat o dodatečné přidělení zdrojů pro přenos dat. U Non-GBR závisí připojení na velikosti dostupných prostředků v síti.

Druhým parametrem je priorita. Priorita určuje, v jaké míře jsou při pakety při jejich zpracování důležité. Využití se nachází při přetížení sítě, kdy pakety s vyšší prioritou dostanou přednost před pakety s nižší prioritou.

Posledními dvěma parametry jsou zpoždění a ztrátovost paketů. Zpoždění udává maximální možnou hodnotu zpoždění pro každou třídu QCI. Hodnota ztrátovosti a chybovosti ukazuje nevyhnutelné ztráty paketů v síti v dané třídě.

QCI	GBR/Non-GBR	Priorita	Zpoždění paketů (ms)	Chybovost a ztrátovost paketů	Příklad služby
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Hlasový hovor
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Video hovor
3	GBR	5	300	$10^{-6}$	Streamované video
4	GBR	3	50	$10^{-3}$	Real-Time hry
5	Non-GBR	1	100	$10^{-6}$	Signalizace IMS
6	Non-GBR	7	100	$10^{-3}$	Hovor, video - živé vysílání
7	Non-GBR	6	300	$10^{-6}$	Video ze záznamu
8	Non-GBR	8	300	$10^{-6}$	WWW, FTP, e-mail
9	Non-GBR	9	300	$10^{-6}$	Jako QCI 8 s nižší prioritou

Tab. 4: Rozdělení QCI v LTE-A



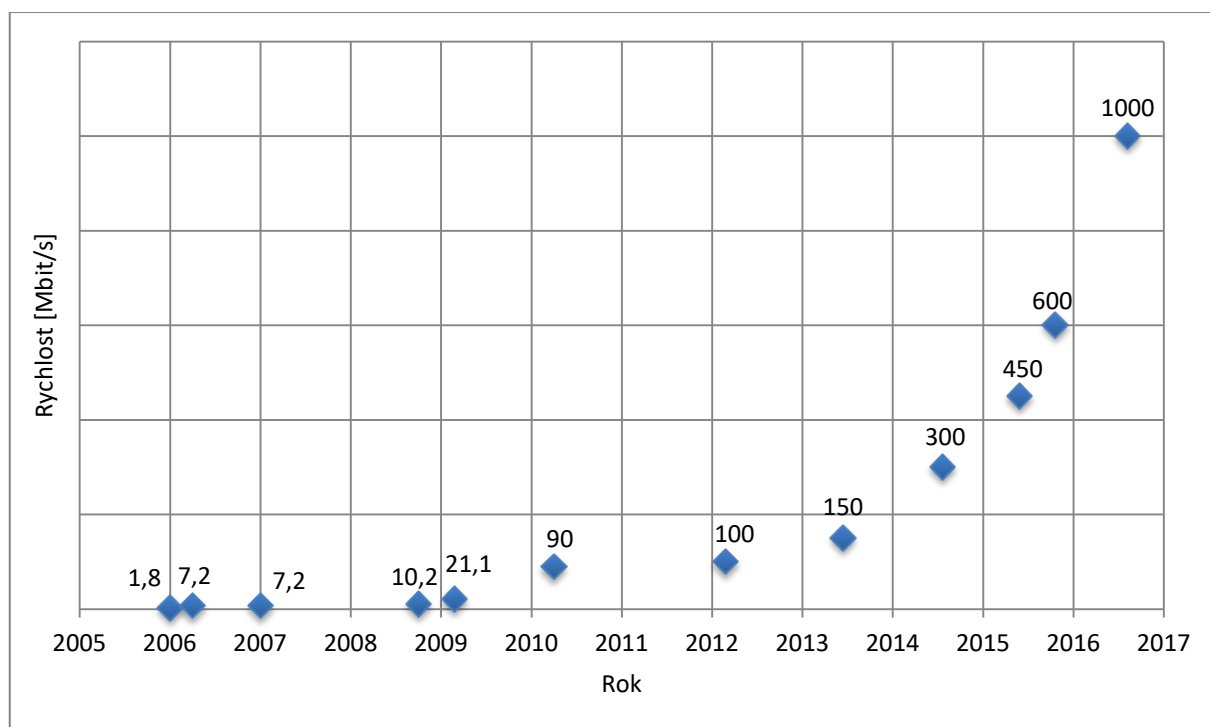
Jak si lze všimnout v tab. 4, LTE-A nabízí řadu služeb ve velmi dobré kvalitě a s minimálním zpožděním, což se hojně využívá jak v pracovním odvětví, tak v odvětví zábavního průmyslu například v podobě streamování her na počítači.

#### 5.4 4.5G

Další vývoj probíhá v podobě rozšíření technologie LTE-A do dalšího mezistupně 4.5G. Nová síť, pod obchodním označením LTE-Advanced Pro, je od poloviny roku 2016 používána prozatím jen pro soukromé sektory. V horizontu několika let by měla být dostupná u všech českých operátorů.

Tato technologie se od předchozí liší opět zvýšením rychlosti o polovinu (až na 1 Gbit/s). Oproti LTE-A bude používat modulaci s více stavy (256-QAM namísto 64-QAM), což umožní přenesení až o třetinu více dat při stejné šířce pásma.

Dalším vylepšením je čtyřantenní systém (4x4 MIMO), který nahrazuje u mobilů a tabletů systém se dvěma anténami. To umožní díky čtyřem nezávislým streamům přenést přes jedno pásmo za stejnou dobu dvojnásobek dat, než je u LTE-A běžné. Tyto čtyři antény navíc budou najednou moci komunikovat na třech různých pásmech s deseti různými streamy.

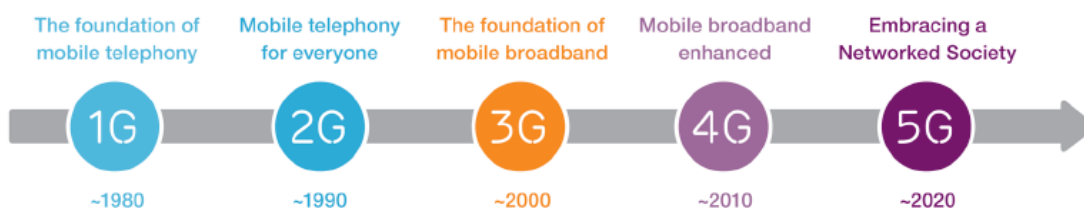


Obr. 10: Vývoj rychlosti mobilních sítí za posledních 12 let

## 6 Budoucnost s 5G sítí

V polovině roku 2017 vyšel společností 3GPP standard Release 15, ve kterém jsou poprvé zmínky o nově nastupující páté generaci mobilních sítí pod názvem 5G. Tato síť bude opět rychlejší, s menším zpožděním a zároveň přináší řadu zajímavých nových technologií reagující na vývoj vědy a techniky. V průběhu června 2018 bude vydán nový Release 16, ve kterém bude tato verze definována podrobněji.

V současné době dochází k širokému testování 5G za účelem optimalizace a správného vyvážení jednotlivých požadavků sítě při určité zátěži. Velké testování proběhlo na zimních olympijských hrách v Pchjongjangu v roce 2018, kde byla nová síť použita například v samořídících autobusech nebo při 360 stupňovém videopřenosu sportovních závodů. Jisté je, že v některých nově vznikajících odvětvích se bude jednat o revoluční standard, jelikož budou poprvé uživatelem i přístroje (internet věcí, Internet of Things). Na komerční trh v některých zemích by měla tato síť dorazit v roce 2020. V České republice se počítá s rokem 2022. (6)

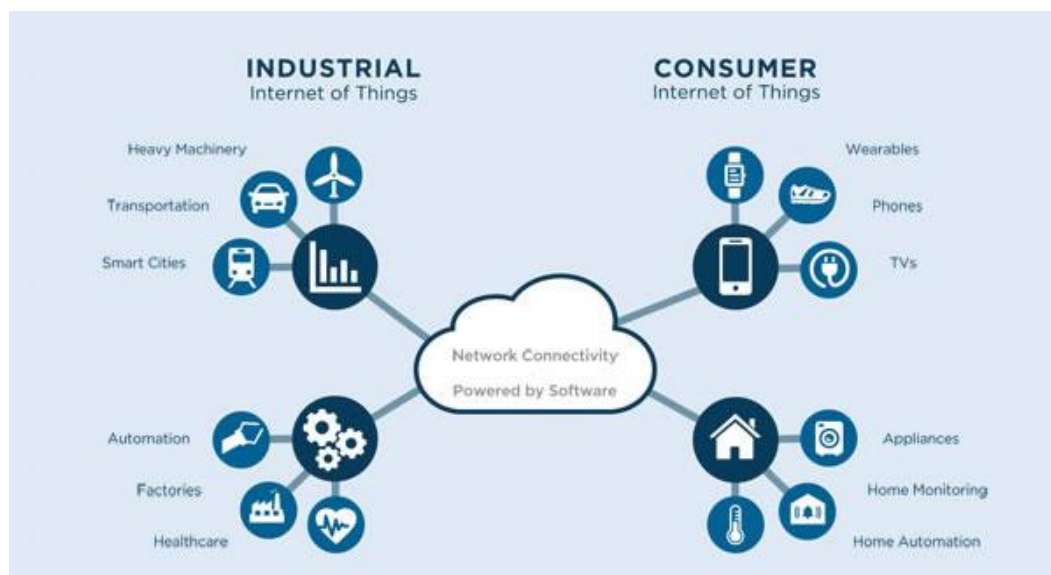


Obr. 11 Vývoj generací celulárních sítí skupinou 3GPP

### 6.1 Služby

Jedním z cílů nové generace je zajištění téměř neomezeného získávání informací a přenosu dat kdykoliv a kdekoliv. Podobně jako u minulých standardů dojde v této generaci k velkému zvýšení rychlosti, a to až na 10 Gbit/s (v ideálním prostředí 20 Gbit/s), skoro nepostřehnutelnému zpoždění v přenosu dat (pod 1 ms) nebo k navýšení přenosové kapacity až tisíckrát. Vzhledem k tomu, že počet uživatelů stále roste, musí být síť spolehlivá, zabezpečená a cenově a energeticky efektivní. Energetická efektivita 5G byla navýšena oproti 4G tisíckrát. (6)

Hlavní změnou oproti verzím LTE je zvýšení celkového výkonu sítě. V následujících letech se počítá s velkým nárůstem uživatelů a to především v rámci IoT (*Internet of Things*). IoT neboli internet věcí je síť všech zařízení, která si mezi sebou vyměňují data. Jedná se o moderní přístroje jako automobily, domácí spotřebiče a další zařízení. Tato zařízení jsou vybavena elektronikou, která umožňuje propojení a přenos dat v rámci sítě.

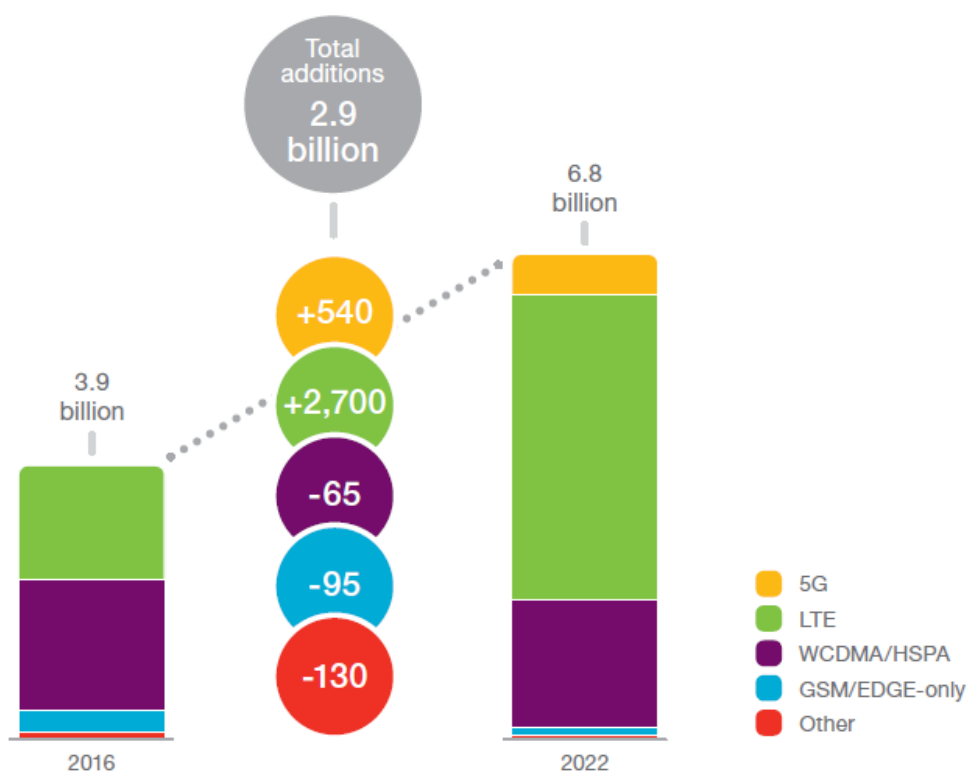


Obr. 12: Příklady zařízení v IoT

Další významnou novinkou je device-to-device komunikace. Zatímco v předchozích verzích byla data přenášena výhradně od uživatele i k uživateli přes páteřní síť, v nové verzi se počítá částečně i s přímou komunikací mezi koncovými účastníky. Bude se toho využívat například mezi dvěma přístroji typu automobil nebo přístroji v domácnosti. Toto opatření by mělo pomoci odlehčit páteřní síť, zvýšit rychlost a snížit zpoždění sítě, avšak hrozí problém v zabezpečení sítě a zároveň bude nutné data shromažďovat v datových zapisovačích o omezené kapacitě.

Zajímavou změnou představuje i network slicing (v překladu krájení sítě), kdy bude možné síť u stejných vysílačů rozdělit na více vrstev. Každá vrstva bude plnit jinou funkci, čímž se zefektivní přenos dat mezi vysílačem a uživatelem.

Okolo roku 2020, kdy se začne 5G síť dostávat v některých zemích do provozu, se odhaduje, že bude internet věcí zahrnovat celosvětově přibližně 30 milionů položek v hodnotě přes 80 miliard dolarů. V období od roku 2016 do roku 2022 se počítá ve světě s celkovým nárůstem mobilních zařízení o přibližně 2,9 miliardy.



Obr. 13: Rozdělení mobilních zařízení v roce 2016 a 2022 dle jednotlivých generací

Z obr. 13 vyplývá, že dojde k přerozdělení těchto zařízení mezi čtvrtou a pátou generací mobilních sítí s převahou 5G v nejvíce zalidněných zónách. U předchozích generací bude docházet k postupnému omezení a do roku 2030 pravděpodobně i vypnutí. Cílem nové sítě je její optimalizace proti přetížení, které by bylo při takových podmínkách v rámci LTE výrazně znát. Nová technologie také počítá s vylepšenou metodou formování paprsků či se zmenšením buněk. (6)

## 6.2 Systém zabezpečení

Nová síť sebou nepřináší změny pouze v oblasti mobilní komunikace, ale i ve služebním a business modelu. Vzhledem k tomu, že 5G síť ovlivňuje velké množství odvětví, je nutné každý jednotlivý subjekt zabezpečit proti úniku informací a napadení zvenčí. Přestože se částečně využívá mechanismu zabezpečovacího systému předchozí generace, je nutné strukturu autentizace adaptovat na novou síť. Skupina 3GPP pracuje na vývoji nových zabezpečovacích systémů například pro rádiovou přístupovou síť, ověřování identifikačních údajů člověka u eSIM karet nebo zabezpečení u network slicing atd. (7)

System autorizace a autentizace bude důležité přizpůsobit nejen internetu věcí, ale i privátním sítím v továrnách nebo rozličným přístupovým technologiím. Počítá se s dvěma verzemi: primární a sekundární. U primární verze bude docházet k povinnému ověření uživatele a bude sloužit k samotnému přístupu k jádru sítě. Sekundární verze bude dostupná až po primárním ověření a může sloužit například u zabezpečení komunikace v rámci firmy. (7)

3GPP připravuje i nové zabezpečení proti DoS (*Denial of Service*) útokům na koncové uživatele. V předchozích verzích byly zaznamenány případy přepojení uživatele na falešnou základnovou stanici, což mohlo vést k útoku hackerů. Řešením může být ověření připojení k správné základnové stanici na základě identity nebo nový systém klíčů.

Network slicing představuje jednu z nejproblémovějších novinek, co se týče zabezpečení. Je to z toho důvodu, že mimo standardní UE zabezpečení bude nutné zabezpečit každou vrstvu jednotlivě. Navíc bude důležitým krokem odizolovat jednotlivé vrstvy tak, aby v případě útoku na jednu vrstvu nešlo proniknout i do vrstev ostatních. Výhodou network slicing je možnost operátora poskytnout pro každou vrstvu zabezpečení na míru. Na vyřešení tohoto zabezpečení usilovně pracuje 3GPP a i když nedošlo ještě k žádné dohodě, řešení je pravděpodobně blízko. (7)



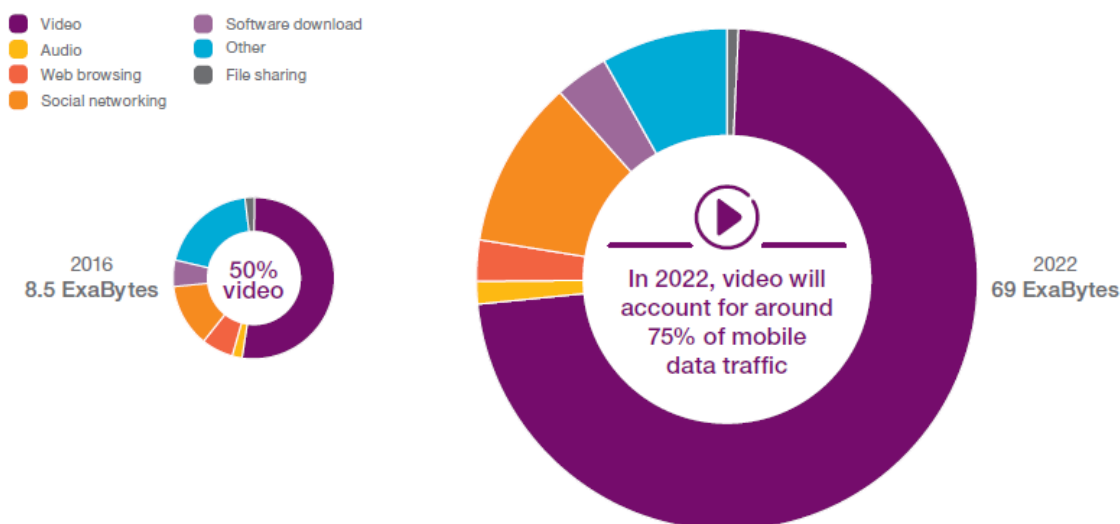
Obr. 14: Jednoduché schéma network slicing v 5G

## 7 Měření kvality datového přenosu

Hlavní náplní této části práce bylo změření rychlosti přenosu dat v různých lokalitách při různých příležitostech. Samotné měření probíhalo ve spolupráci se společností O2 Czech Republic a.s., od které mi byl i zapůjčen měřicí terminál, pomocí něhož bylo možné změřit velké množství parametrů včetně rychlosti dowlink, uplink či polohy. Naměřené hodnoty tedy odrážejí parametry přenosu pro zákazníky společnosti O2.

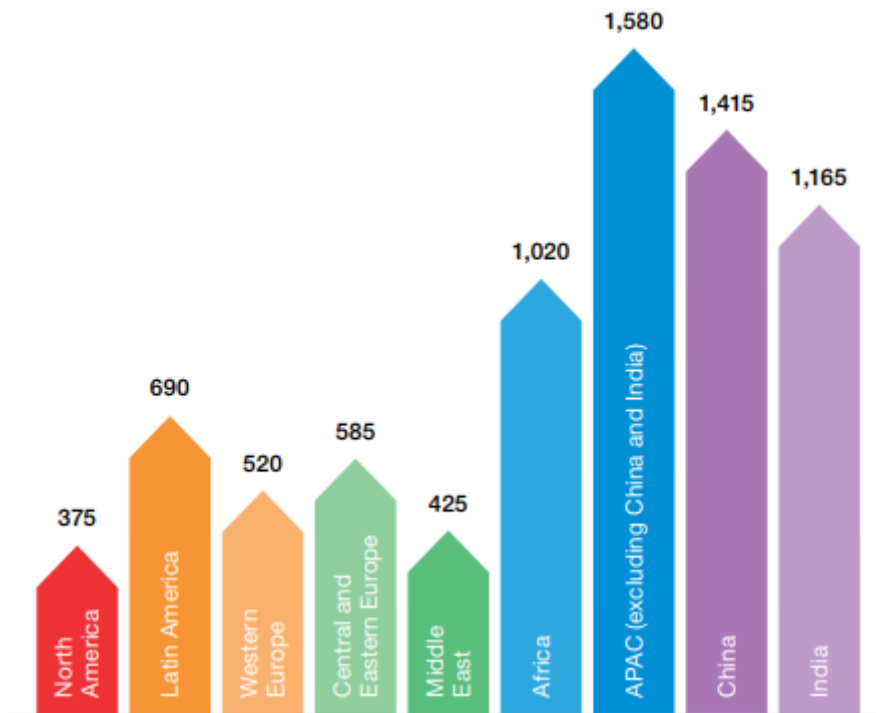
Celé měření je prováděno v mobilní síti, která se v současné době prudce rozvíjí. Objemy dat přenesené prostřednictvím ADSL a VDSL přípojek, které jsou používané především v domácnostech či kancelářích zůstávají dominantní, avšak možnosti mobilní sítě mají stále velké rezervy. Hlavní vliv na vzestup mobilních sítí má obrovský technologický vývoj mobilních zařízení, kdy nejnovější smartphony počítají u většiny aplikací s tím, že uživatel bude mít přístup k internetu. Dalším faktorem je očekávaný rozvoj zařízení internetu věcí (IoT). Nejnovější trendy, zahrnující sociální sítě či herní průmysl, se v podobě aplikací objevují na většině moderních telefonů a například aplikace na vzájemnou komunikaci uživatelů Messenger je v současné době nainstalována na více než miliardě mobilních zařízení.

Do budoucna se počítá s nejvyššími objemy přenesených mobilních dat při přehrávání nebo streamování videí, což lze vidět v obr. 15. V roce 2016 činil datový přenos v podobě videa přibližně 50 % z celkové hodnoty. Do roku 2022 se počítá s nárůstem přenosu videa až na 75 % z celkového množství přenesených dat. Velkou měrou se na těchto hodnotách podílí internetové servery pro sdílení videosouborů, či internetové televize. Trendem především mezi mladšími generacemi je sledování serveru Youtube, kam lidé mohou ukládat nejrůznější videa. Okolo 70% všech videí je v této době přehráváno na mobilních zařízeních s tím, že počet uživatelů mobilních datových přenosů se každým rokem zvyšuje.



Obr. 15: Porovnání využití aplikací v roce 2016 a odhad pro rok 2022

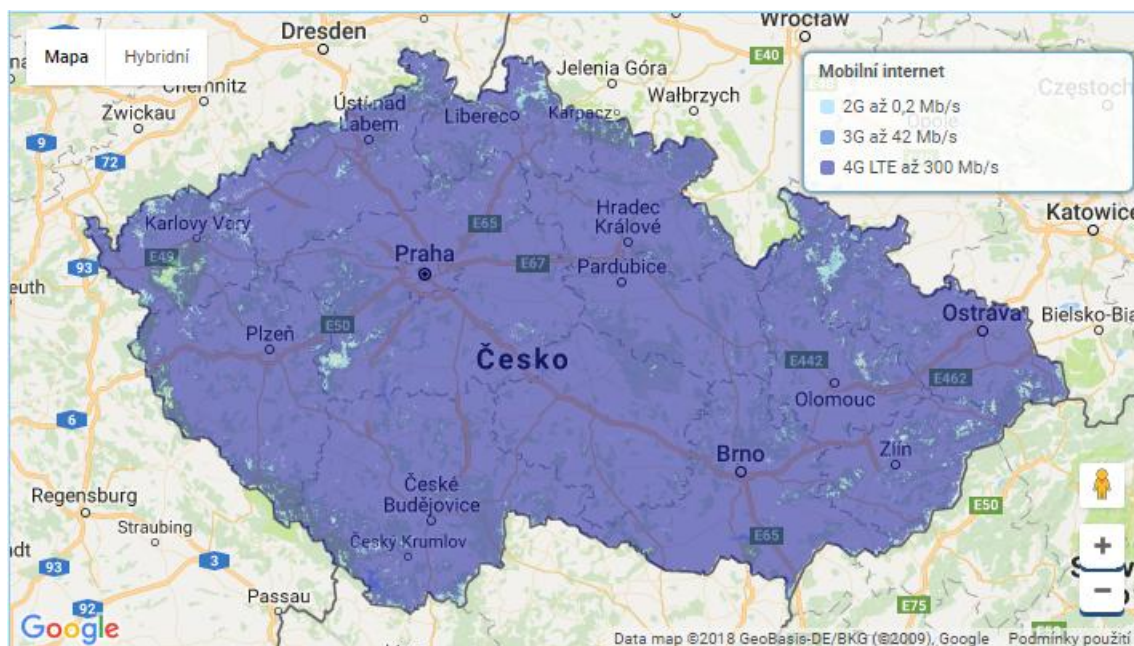
Celosvětově bylo na konci roku 2017 5,2 miliardy předplacených karet u mobilních zařízeních. Z obr. 16 vyplývá, že největší množství předplatitelů se nachází v Asii. Na evropském kontinentu registrujeme přes miliardu mobilních zařízení a v České republice využívá mobilní síť přibližně 60% obyvatel tedy přibližně 6 milionů uživatelů. Jen ve čtvrtém kvartálu roku 2017 přibylo celosvětově 53 milionů zařízení, což je nárůst na 103% oproti předchozímu přírůstku. Do budoucna se počítá u mobilních sítí s dalším velkým nárůstem objemu přenesených dat, který však bude stále menší, než přenos dat uskutečněný prostřednictvím ADSL či VDSL přípojek. Je to z důvodu toho, že u páté generace sítí se počítá spíše se zaměřením na internet věcí, kde se nepředpokládá přenos dat v podobě videa, což je hlavní zdroj spotřeby. (8)



Obr. 16: Výskyt mobilních zařízení v jednotlivých místech na Zemi (údaje jsou v milionech)

Od roku 2015 se v České republice na většině území setkáme se sítí 4G (LTE), která je v roce 2018 maximem i ve světě. Nově testovaná síť 5G se očekává v roce 2022, avšak do provozu se bude dostávat nejspíš postupně dle hustoty zalidnění v jednotlivých regionech. Z obr. 17 vyplývá, že operátor O2 nabízí síť 4G téměř po celé České republice. Obrázek je ovšem v některých místech brán spíš orientačně a síť nefunguje všude na 4G. Tyto místa jsou především v řidčeji obydlených částech ČR, kde se operátorovi nevyplatí investovat do rozšíření sítě.





Obr. 17: Mapa pokrytí mobilní sítě společností O2 v České republice

## 7.1 Metodika měření

Důležitou součástí každého měření je vypracování strategie, jakým způsobem by mělo samotné měření probíhat, kde by mělo probíhat a za jakým účelem. V této práci se jedná, jak již bylo zmíněno, o zjištění kvality přenosu a s tím související spokojenosti zákazníků. Důležité bylo určit, které parametry je potřeba vlastně měřit. Nakonec padla volba na rychlost stahování ve směru k uživateli (downlink) a v opačném směru od uživatele (uplink). Dalším parametrem byla poloha, která hrála roli především v určení přesného místa poklesu rychlosti sítě. V některých případech, především pro měření na delší dobu, byla měřena i latence (zpoždění). Mimo hlavní parametry byly změřeny i jiné vedlejší parametry, které jsou ovšem nad rámec této práce.

### 7.1.1 Výběr lokalit

Dle zadání bylo nutné zjistit místa, ve kterých v souvislosti s vyšším počtem zákazníků dochází k poklesu rychlosti přenosu dat, či úplnému výpadku sítě. Hledala se tedy místa s vysokou okamžitou koncentrací obyvatel.

První variantou bylo hledání pravidelného přetěžování sítě v určitých místech nebo určitých trasách. To představují například příměstské vlaky linky S pražské integrované dopravy, kde dochází již několik let k velkému přetěžování sítě a to jak ve vlaku, tak na nádražích. Kapacita vlaků na některých úsecích mnohdy není dostatečná a další přidání

dalších spojů není možné z důvodu nedostatečné železniční infrastruktury. V roce 2017 se opět zvýšila popularita vlakové dopravy mezi obyvateli přilehlých měst a obcí Prahy. Celkově byl v roce 2017 zaznamenán nárůst cestujících vlakem v rámci pražské integrované dopravy o 14% na 138 tisíc lidí denně. V tab. 5 jsou vyznačeny jednotlivé úseky a vytiženost cestujícími. Nejvyšší počet cestujících je registrován v úseku Praha hl.n. - Benešov, kde je denně linkou S9 přepraveno přes 30 tisíc obyvatel. Naopak nejmenší počet cestujících (přibližně 600 denně) využívá linku S65 vedoucí z Prahy do Rudné u Prahy a zpět. Provoz za minulý rok vzrostl u všech linek S, až na linku do Kladna (S5) a do Kralup nad Vltavou (S4).

Trasa	Linka	Počet přepravených cestujících v roce 2017
Praha hl.n. - Benešov u Prahy	S9	30885
Praha Smíchov - Beroun (přes Nučice)	S6	2443
Praha hl.n. - Rudná u Prahy	S65	598
Praha Masarykovo n. - Kolín	S1	24661
Praha Masarykovo n. - Nymburk	S2	24374
Praha-Bubny Vltavská - Kladno	S5	6498
Praha Masarykovo n. - Kralupy n.Vlt.	S4	14410
Praha Vršovice - Mladá Boleslav	S3	5034
Praha hl.n. - Čerčany (přes Zbraslav)	S8	3573
Praha hl.n. - Beroun (přes Radotín)	S7	22418

Tab. 5: Počet cestujících na linkách S pražské integrované dopravy za rok 2017

Zdroj: <https://pid.cz>

Vzhledem k tomu, že osobně jezdím několikrát týdně do Českých Budějovic, kde mám bydliště, jsem považoval za zajímavé změřit mimo jiné i cestu vlakem z Prahy do Českých Budějovic. Tato trasa je součástí čtvrtého železničního koridoru z Děčína do Dolního Dvořiště a denně přepraví desetitisíce lidí. Vypozoroval jsem, že v určitých úsecích je datový přenos v podstatě nemožný. Nabízelo se tak změřit místa bez pokrytí signálem a zjistit, zdali by bylo ekonomicky výhodné pro operátora se těmito hluchými místy zabývat.



Obr. 18: Čtvrtý železniční koridor v ČR

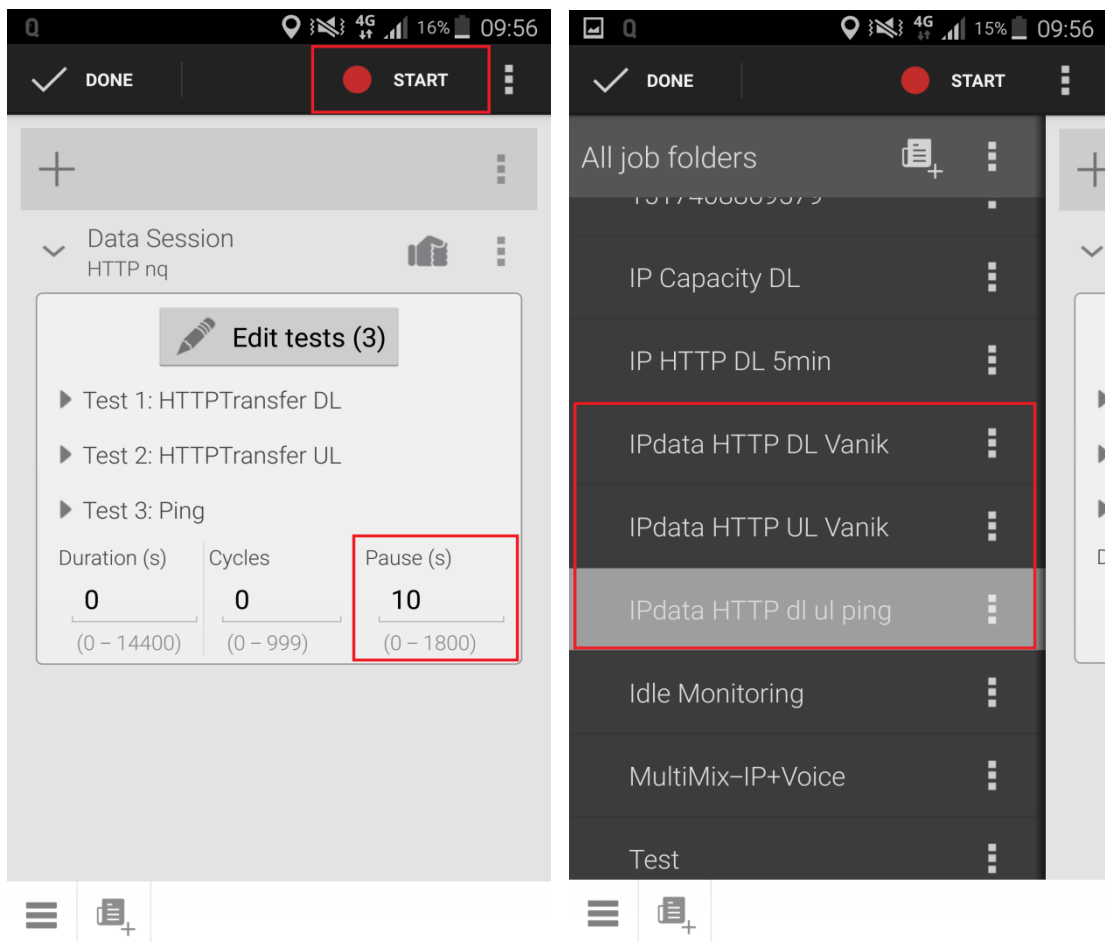
Druhou variantou bylo změření zatížení sítě při neočekávaném shluku lidí na určitém místě. Mobilní síť v takových případech podle předpokladů nedokáže pokrýt požadavky zákazníků a dochází k velkému přetížení a v krajních případech dokonce k výpadku sítě. Snahou bylo tedy identifikovat taková vybraná místa a z naměřených dat následně hledat cesty, jak předcházet problémům. Vytipování těchto míst není snadnou záležitostí, jelikož rozhoduje velké množství faktorů v daný čas a jde spíše o metodu pokusu a omylu. Příkladem míst se zvýšeným počtem lidí v daný čas jsou například obchodní centra, kulturní či sportovní akce, nebo například demonstrace. V obchodních centrech a na různých akcích je předpoklad vyššího množství základnových stanic, jelikož se částečně s velkým počtem lidí počítá alespoň v určitou předem stanovenou dobu. Oproti tomu při demonstraci velkého počtu lidí na venkovním prostranství je předpoklad velkého zatížení bez dodatečného posílení sítě, protože se zde často dějí chaotické přesuny lidí, na které není operátor schopen reagovat.

Další variantou spontánního shluku lidí může být i autonehoda na frekventované silnici. Ve chvíli, kdy je silnice zablokována, si mohou řidiči zkrátit čas procházením internetu nebo oznamují jiným lidem případné zpoždění. Například při několikakilometrové koloně na dálnici D1 vedoucí z Prahy do Brna by případná dopravní kalamita mohla vést k přetížení sítě tisíci uživateli, kteří by jinak v daném úseku data nepoužívali.

### 7.1.2 Aplikace QualiPoc

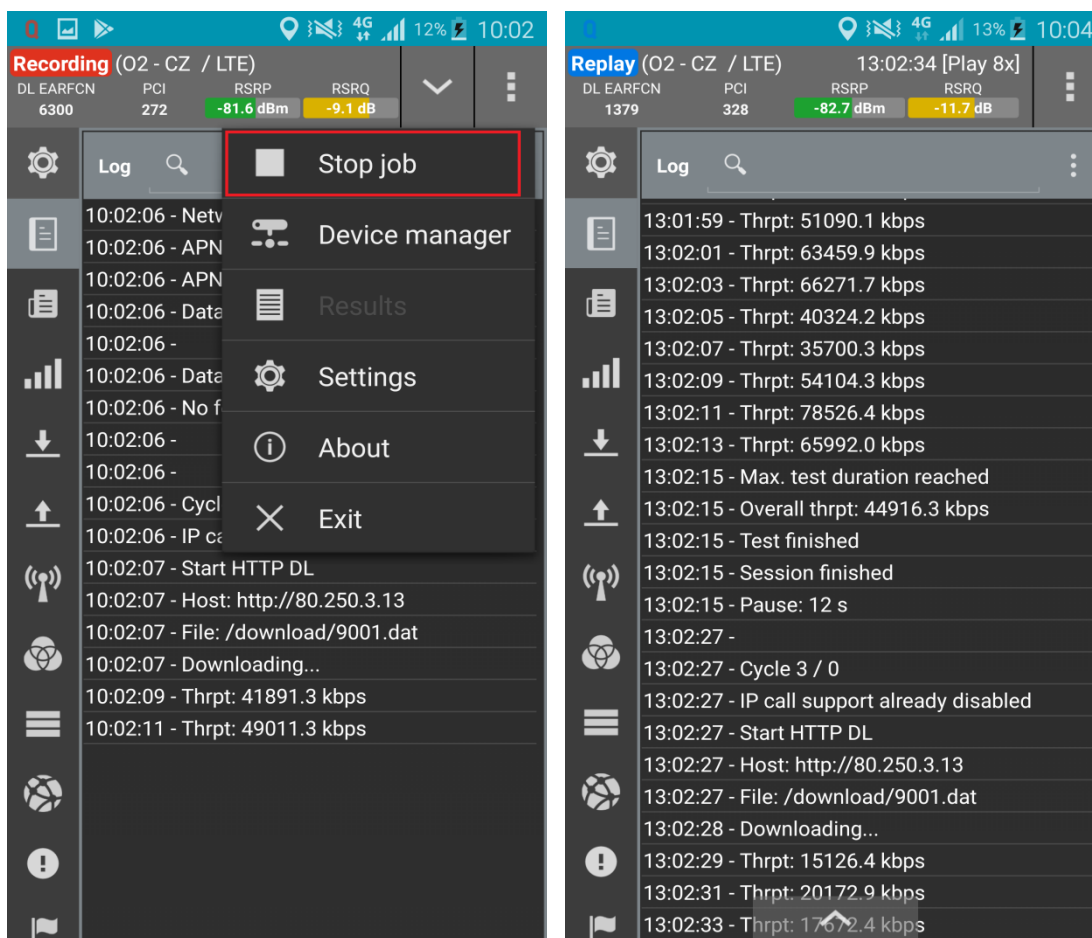
Po vybrání jednotlivých lokalit bylo nutné sehnat zařízení, kterým by bylo možné změřit všechny potřebné údaje. Ve spolupráci s mobilním operátorem O2 Czech Republic mi byl zapůjčen měřicí terminál v podobě mobilního telefonu Samsung Galaxy Note 4, který byl vyroben speciálně na zakázku pro účely právě této společnosti. Tento telefon zároveň obsahuje mobilní aplikaci QualiPoc, pomocí které lze naměřit všechna potřebná data pro vyhodnocení. Aplikace QualiPoc byla vyvinuta švýcarskou firmou SwissQual. Hlavními funkcemi této aplikace je měření kvality vybraných parametrů datových a hovorových služeb.

Po spuštění QualiPoc je důležité definovat údaje, které uživatel ve výsledku očekává. V mém případě se jednalo o tři typy měření: samotný download (DL), samotný upload (UL) a společně DL+UL+ping.



Obr. 19+20: Spouštění předdefinovaného měření kvality datového přenosu a nastavení pauzy k synchronizaci na obrázku vlevo + jednotlivé typy měření na obrázku vpravo.

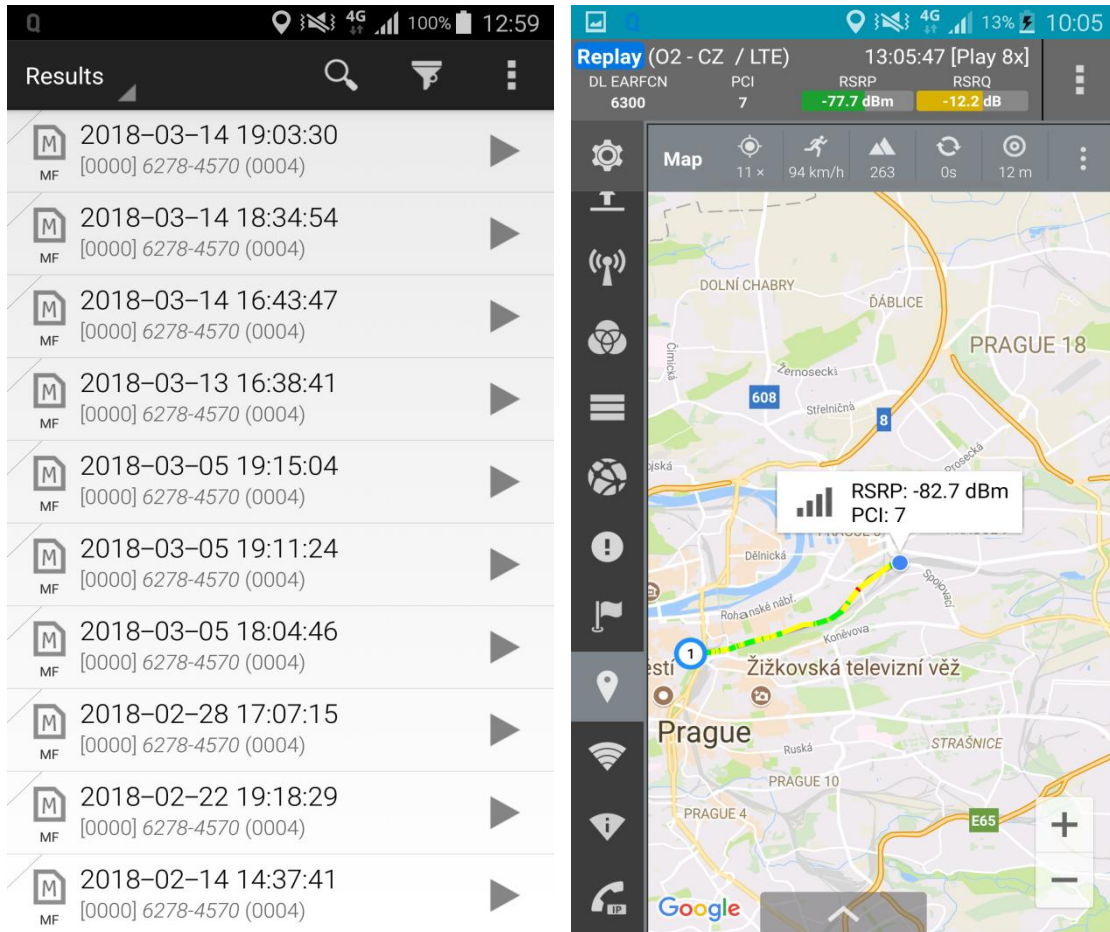
QualiPoc pracuje v cyklech. Délka jednoho cyklu závisí na množství měřených parametrů, které se střídají. Po každém měřicím cyklu je důležitá určitá pauza, která slouží k synchronizaci a zároveň se v ní obvykle přepíná síť na rychlejší. Děje se tak z důvodu toho, že při měření například downloadu lze jednoduše přecházet z 4G na 2G síť, avšak opačný proces je značně obtížný a obvykle se ani neuskuteční. Pauza má tedy za úkol najít nejrychlejší možnou variantu přenosu dat. Nejčastěji byla použita pauza mezi cykly v rozmezí 10-15 sekund v závislosti na tom, zdali se člověk pohybuje nebo stojí na jednom místě.



Obr. 21+22: Tlačítko na zastavení měření na obrázku vlevo + tok změřených rychlostí v rámci měření download na obrázku vpravo

Aplikace měří zároveň i další méně důležité parametry, z nichž bylo použito například měření polohy. Po definici parametrů stačí mít po celou dobu měření zapnutá mobilní data na mobilním zařízení a spustit tlačítko start. Telefon musí být celou dobu zapnutý, jinak by se měření automaticky vypnulo. Data jsou během měření automaticky po celou dobu ukládána a po zastavení měření tlačítkem stop lze jednoduše data poslat na předem

stanovené úložiště dat, kde s nimi lze dále pracovat. Z úložiště se data převedla na počítači do tabulky ve formátu Microsoft Excel, kde je možné další zpracování například ve formě grafů nebo tabulek. V případě potřeby lze každé měření znovu zobrazit na mobilu v rámci aplikace funkcí Replay, kdy se až v 8x zrychleném módu postupně v reálném čase zobrazí všechna data daného měření.



Obr. 23+24: Přehled výsledků podle času měření + příklad kvality měření v závislosti na poloze

## 7.2 Průběh měření

Samotná měření probíhala během února a března roku 2018. Základní data jsou zaznamenána v tab. 6.

číslo měření	datum (rok 2018)	trasa / místo měření	linka	typ měření
1	1. 2. 11:31-13:54	Praha - České Budějovice	vlak R 711	DL+UL+ping
2	5. 2. 17:55-19:57	České Budějovice - Praha	vlak Ex 1544	DL+UL+ping
3	6. 2. 14:30-14:55	Ohrada-Náměstí Republiky	bus 207	DL+UL+ping
4	6. 2. 14:58-16:05	OC Palladium	-	DL+UL+ping
5	6. 2. 16:07-16:43	OC Palladium-Sídlíště Petřiny-Bílá Hora	tram 2 + bus 164	DL+UL+ping
6	6. 2. 17:08-18:07	Bílá Hora-Hloubětín	tram 25	DL+UL+ping
7	6. 2. 18:21-18:40	Vysočanská-Spojovací	bus 182	DL+UL+ping
8	7. 2. 10:55-11:21	Hlavní nádraží Praha-Zbraslav	vlak S8 Os 9007	DL
9	7. 2. 11:37-12:05	Zbraslav-Hlavní nádraží Praha	vlak S8 Os 9008	UL
10	7.2. 12:07-12:33	Hlavní nádraží Praha-Radotín	vlak S7 Os 8836	DL
11	7. 2. 12:38-12:58	Radotín-Hlavní nádraží Praha	vlak S7 Os 8837	UL
12	12. 2. 14:03-14:30	Nad Džbánem-Národní třída	tram 20	DL+UL+ping
13	12. 2. 14:34-14:47	Národní třída-Smíchovské nádraží	tram 22	DL+UL+ping
14	12. 2. 15:16-15:31	Nádraží Smíchov-Řeporyje	vlak S6 Os 19964	DL
15	12. 2. 16:00-16:13	Řeporyje-Nádraží Smíchov	vlak S6 Os 19923	UL
16	12. 2. 16:50-17:15	Hlavní nádraží Praha	-	DL
17	13. 2. 13:00-13:22	Masarykovo nádraží-Klánovice	vlak S1 Os 9329	DL
18	13. 2. 13:40-14:00	Klánovice-Masarykovo nádraží	vlak S1 Os 8608	UL
19	13. 2. 14:16-14:43	Masarykovo nádraží-Čakovice	vlak S34 Os 7776	DL
20	13. 2. 14:53-15:07	Čakovice-Praha Vysočany	vlak S3 Os 9531	UL
21	13. 2. 15:33-15:42	Praha Vysočany-Horní Počernice	vlak S22 Os 9421	DL
22	13. 2. 16:01-16:21	Horní Počernice-Masarykovo nádraží	vlak S2 Os 5828	UL
23	14. 2. 11:31-11:55	Praha Bubny Vltavská-Ruzyně	vlak S5 Os 9816	DL
24	14. 2. 11:56-12:15	Ruzyně-Praha Bubny Vltavská	vlak S5 Os 9861	UL
25	14. 2. 12:36-12:54	Masarykovo nádraží-Sedlec	vlak S4 Os 6914	DL
26	14. 2. 13:04-13:20	Sedlec-Masarykovo nádraží	vlak S4 Os 9631	UL
27	14. 2. 13:53-14:19	Hlavní nádraží Praha-Zličín	vlak S65 Os 25916	DL
28	14. 2. 14:37-15:11	Zličín-Hlavní nádraží Praha	vlak S65 Os 25917	UL
29	22. 2. 19:28-01:40	Maturitní ples - České Budějovice	-	DL+UL+ping
30	28. 2. 17:07-20:04	Hokejové utkání - Budvar aréna ČB	-	DL+UL+ping
31	5. 3. 18:04-19:55	Demonstrace Václavské náměstí 1	-	DL+UL+ping
32	14. 3. 19:03-20:00	Demonstrace Václavské náměstí 2	-	DL+UL+ping

Tab. 6: Tabulka naměřených lokalit a tras

Důležitým faktorem byla volba denní doby. V některých případech tato možnost nešla ovlivnit (například u sportovních akcí nebo demonstrací), avšak u vlakových spojů bylo možné zvolit konkrétní dobu, při které byla měření prováděna. Nejdůležitějším parametrem bylo vytížení jednotlivých spojů. Vybral jsem měření v pracovních dnech v odpoledních hodinách (od 12:00 do 16:00), kdy je využití sítě přibližně v 80 % denního maxima. Denní maximum v pracovních dnech nastává přibližně mezi 20:00 a 22:00 hod.

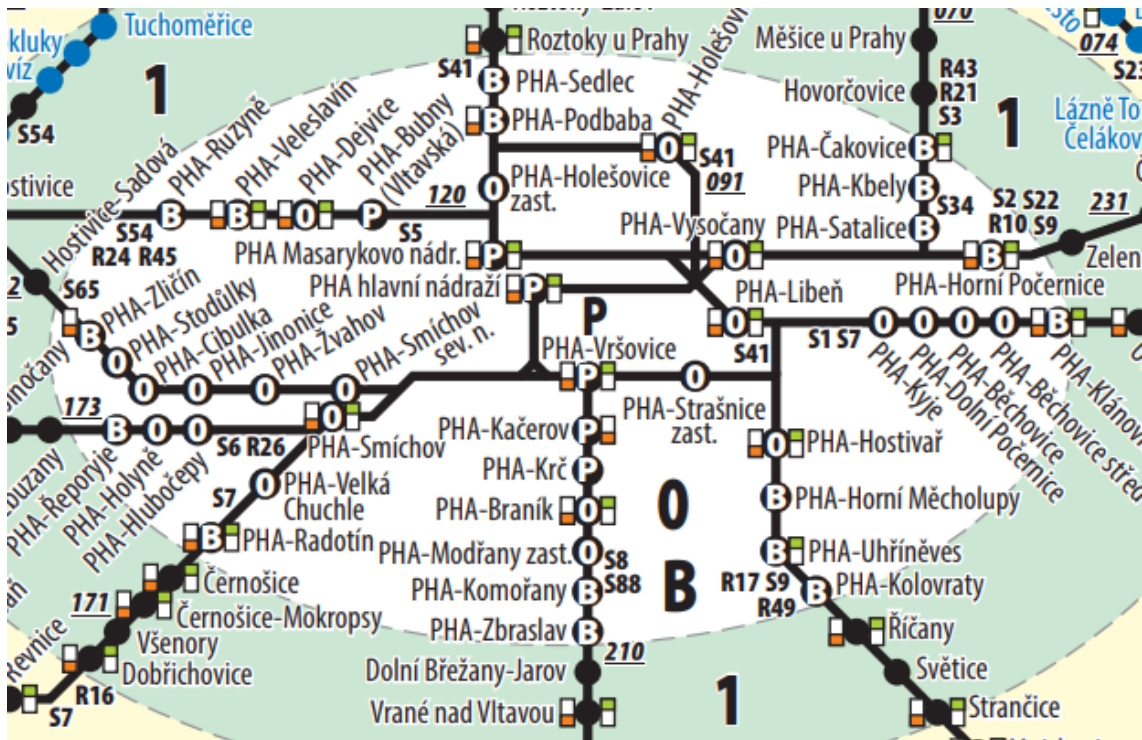
V odpoledních hodinách byl předpoklad většího zájmu cestujících směrem z centra Prahy do okolních lokalit, jelikož se lidé vraceli z práce nebo ze školy. Tento předpoklad se potvrdil, jelikož byly soupravy směrem z centra zaplněnější.

Při měření vlakových úseků byla zaznamenána řada faktorů, které měření kvality datového přenosu přímo ovlivňují. Jedním z nich byl zvolený typ soupravy, kdy pro různé linky nasazují dopravci různá vozidla. Z tohoto důvodu docházelo v některých případech k mírnému rušení signálu, případně docházelo ke zhoršenému snímání polohy během cesty. Největší rozdíl byl pozorován při cestě vlakem do Českých Budějovic a zpět. Při cestě staršími vagóny, které jsou obvykle nasazovány na rychlíky, dochází často k výpadkům signálu a to až na 60% trasy. Novější vagóny, které jsou používány pro expresy, jsou oproti starším soupravám výrazně méně náchylné na rušení signálu a k výpadkům dochází jen velmi zřídka. Dalším faktorem může být mimořádné zatížení sítě cestujícími, které se liší v každém vlaku. Přestože jsou statistiky denní přepravy lidí na dané lince, není zaručeno, že lidé využívají služby operátora O2 a zároveň v ten daný okamžik přenášejí data prostřednictvím internetu.

Při cestování linkami S v Praze byl měřen pouze parametr downlink jedním směrem a uplink směrem nazpět. Vzhledem k tomu, že mé cestování daným vlakem probíhalo vždy z centra na okraj a následně vyčkání na zpáteční vlak, tak bylo mou snahou změřit data co nejpřesněji. Kdyby se měřil downlink a uplink zároveň, bylo by možné, že se v místě náhlého výpadku stane, že se naměří pouze snížení ve směru stahování či nahrávání, nebo by v horším případě došlo v daný čas k pauze nutné pro změnu měřených parametrů. Důležitou součástí tohoto stylu měření bylo zvolit stejné typy drážních vozidel, a to jak ve směru tam, tak ve směru zpět. To se podařilo na všech úsecích, až na linku S3, kde byla při měření parametru uplink jiná souprava. Měření



probíhalo pouze v zónách pražské integrované dopravy P, 0 a B, jelikož je zde největší hustota cestujících. Jednotlivé trasy jsou vyznačeny na obr. 25.



Obr. 25: Přehled tras v rámci pásma P, 0 a B (označeno bílou barvou), které byly změřeny

Dalším typem měření bylo v rámci uzavřených budov. Konkrétně se jednalo o obchodní centrum Palladium v Praze, kulturní dům Metropol v Českých Budějovicích a stadion Budvar aréna taktéž v jihočeské metropoli. U všech těchto budov se předpokládá počet uživatelů mobilní sítě v řádu tisíců. Zjišťoval jsem, jak jsou jednotlivá místa přizpůsobena na denní provoz nebo v případě budějovických budov na plánovanou akci v podobě maturitního plesu nebo hokejového utkání.

V obchodním centru Palladium bylo pozorováno dobré pokrytí signálem a to uvnitř některých obchodů. Výhodou tohoto centra je možnost připojení k veřejně přístupné WIFI síti, která potenciálně zmenší počet uživatelů, kteří obvykle využívají data mobilního operátora.

Při návštěvě maturitního plesu byla údajně obsazena maximální kapacita kulturního domu Metropol. Tento dům se skládá z několika velkých místností, z nichž hlavní je sál, kde probíhají veškeré ceremonie a zároveň se zde nachází taneční parket. Právě zde se nacházela nejvyšší koncentrace návštěvníků, a proto se na tomto místě měřilo převážnou dobu návštěvy. Předpoklad byl takový, že lidé při hlavních událostech plesu

(předtančení, nástup, šerpování, půlnoční překvapení) zatíží ve větším množství síť z důvodu streamování apod.

Další navštívenou událostí v uzavřeném prostoru byl hokejový zápas v českobudějovické Budvar aréně. Na tento zápas, který se konal 28. 2. 2018, dorazilo celkem 5803 diváků, což je přibližně 90% kapacity stadionu a v sezóně 2017/2018 průměrná návštěva. V této hale se opět využívá WIFI síť, která je ovšem často přetížená a lidé proto využívají především mobilní data. Zde byl předpoklad takový, že během samotné hry bude síť fungovat plynule, zatímco při dvou přibližně osmnáctiminutových pauzách dojde k přetížení sítě a velkému poklesu rychlosti.

Posledním typem měření byly nenadálé události. Vybral jsem si měření dvou demonstrací na Václavském náměstí v Praze. Na obou demonstracích se nacházeli lidé všech věkových kategorií a většina z nich hojně využívala mobilních zařízení. V prvním případě demonstrovalo dle pořadatelů až 10 tisíc lidí, zatímco druhé demonstrace se účastnilo přibližně 3 tisíce občanů. Přes Václavské náměstí, které leží v centru Prahy, projdou denně desetitisíce lidí. Jedná se jak o místní obyvatele, tak o turisty. Síť by měla být tedy standardně připravena na vyšší zatížení, avšak v obdobně extrémní situaci je předpoklad, že bude síť přetížena. Navíc během měření se do davu demonstrujících občanů zamíchala i část turistů, kteří o této akci vůbec nevěděli a vzhledem k těžké průchodnosti do jižní části Václavského náměstí se zde zdrželi i více jak půl hodiny.

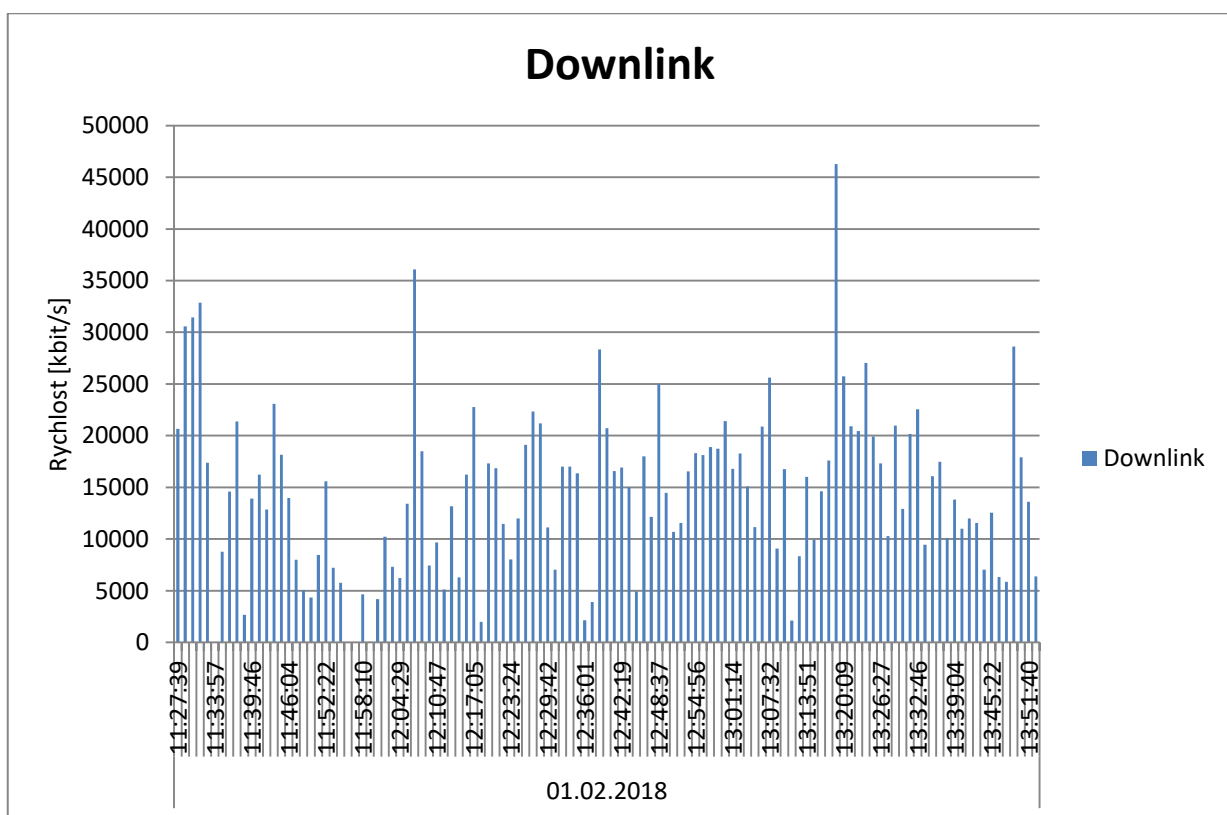
### **7.3 Dílčí výsledky**

Samotné výsledky měření byly zpracovány, jak již bylo zmíněno v podkapitole 7.1.2, pomocí programu Microsoft Excel 2007. V tomto programu se využilo kontingenčních tabulek a grafů, které umožňují jednoduše filtrovat data podle potřebných kategorií. V mém případě se jednalo o grafy zobrazující čas na ose x a rychlost přenosu mobilních dat v jednotkách kbit/s na ose y. Všechny hodnoty jsou zprůměrované za období jednoho cyklu a přenos downlink a uplink je rozlišen barvou. V prvním případě je barva sloupců modrá, v druhém případě se jedná o barvu červenou.

#### **7.3.1 Vyhodnocení měřených míst**

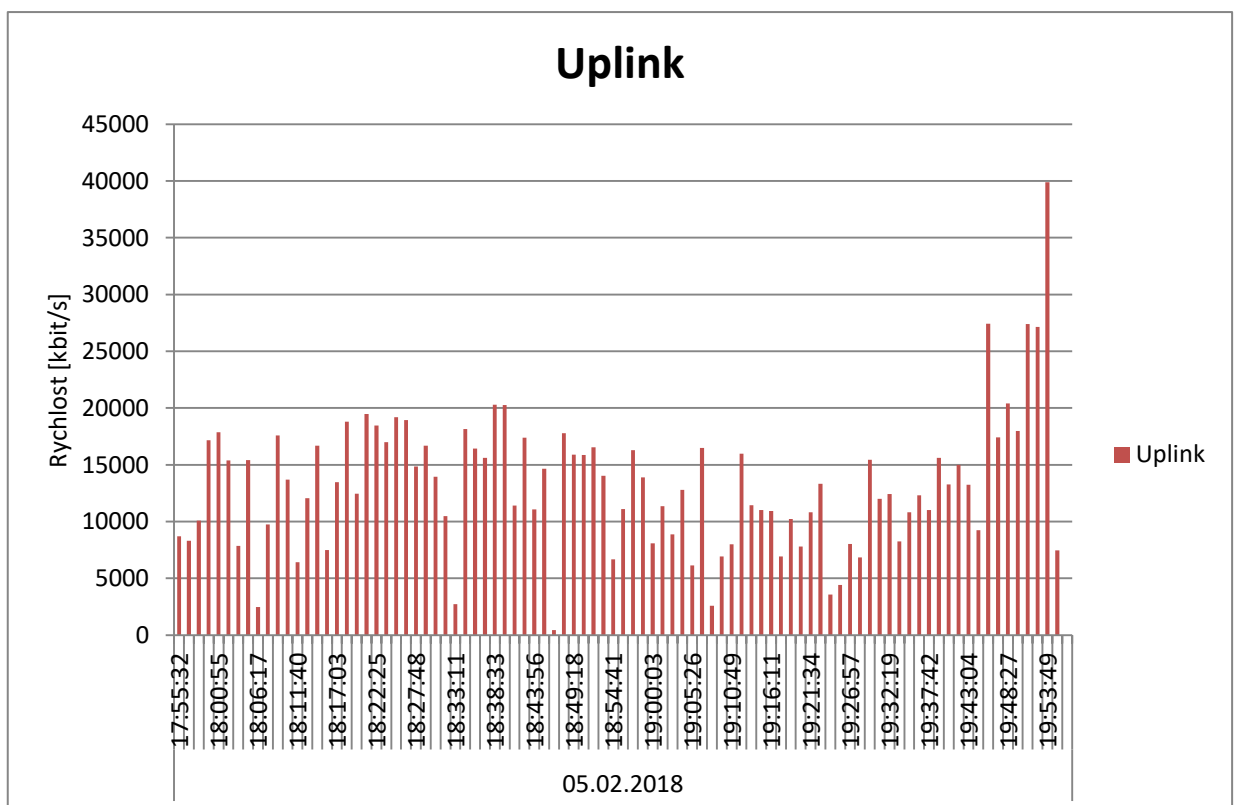
První měření proběhlo v rámci dvou cest vlakem mezi Prahou a Českými Budějovicemi. Zde byl předpoklad takový, že v některých místech bude signál prakticky nulový, avšak bude záležet na typu soupravy. Při první cestě z Prahy do Českých Budějovic byly

nasazeny vagóny zastaralé a po celou dobu byl měřen pouze downlink. Celková průměrná rychlost přenosu trasy byla přibližně 14,7 Mbit/s. Dle obr. 26 se potvrzuje, že v některých úsecích byl naměřen téměř nulový signál. Konkrétně se jedná o oblast mezi Mnichovicemi a Čerčany u Prahy, kde vlak projížděl okolo 11:55. Je možné, že v této době projížděl vlak na vedlejší koleji nebo pravděpodobněji se jedná o místo s menším pokrytím signálu. Dalším kritickým místy jsou tunely před Olbramovicemi a Tábořem. Zde se jednalo o krátkodobé výpadky spojené se špatným (v podstatě nulovým) signálem v tunelech. Konkrétně šlo o časy 12:17 resp. 12:36. Po cestě z Tábořa do Českých Budějovic se rychlost přenosu mobilních dat držela v nadprůměrných hodnotách. Ke snížení signálu došlo pouze v Plané nad Lužnicí, kde pravděpodobně došlo ke křížení vlaků nebo náhlému snížení rychlosti z neznámých důvodů. V obr. 26 je tento jev zaznamenán přibližně v čase 13:10. Posledním kritickým místem je neobydlená zóna lesních jehličnatých porostů před Hlubokou nad Vltavou v blízkosti Českých Budějovic. Zde je pozorována dlouhodobě snížená rychlost mobilních dat a velmi často zde dochází i k výpadkům signálu. Zde se vlak nacházel přibližně v 13:45 a ve směru downlink se pohybovala rychlost okolo 5 Mbit/s.



Obr. 26: Přenos downlink při cestě z Prahy do Českých Budějovic

Při opačné cestě o 4 dny později z Českých Budějovic do Prahy byl měřen naopak pouze přenos uplink. Tentokrát se jednalo o moderní vlakovou soupravu s pravděpodobně nově zrekonstruovanými vagóny. Průměrná dosažená rychlost byla tentokrát přibližně 13,3 Mbit/s, což je jen o 1,4 Mbit/s méně, než v případě měření downlinku při cestě z Prahy do Českých Budějovic. Po celou dobu byl zaznamenán zlepšený signál, což bylo z mého pohledu způsobeno novější vlakovou soupravou. Na obr. 27 je vidět přehled rychlosti mobilních dat za celou cestu. Oproti minulému grafu jsou jednotlivé hodnoty přetočeny, jelikož se vyjelo z opačného směru. Je zřejmé, že jednotlivé poklesy signálu byly zaznamenány ve stejných místech, jako v předchozím případě měření. Opět tedy došlo k výpadku signálu v místech s tunely a v neobydlených místech s vysokým lesním jehličnatým porostem. Při cestě ve starších soupravách občas dochází (pravděpodobně z důvodu silné výplně oken) k velkému rušení signálu, což má za následek občasné výpadky signálu a snížení rychlosti mobilních dat, ale v tomto případě bych se spíš přikláněl k názoru, že současný stav rychlosti mobilních dat na této trati je dostačující.

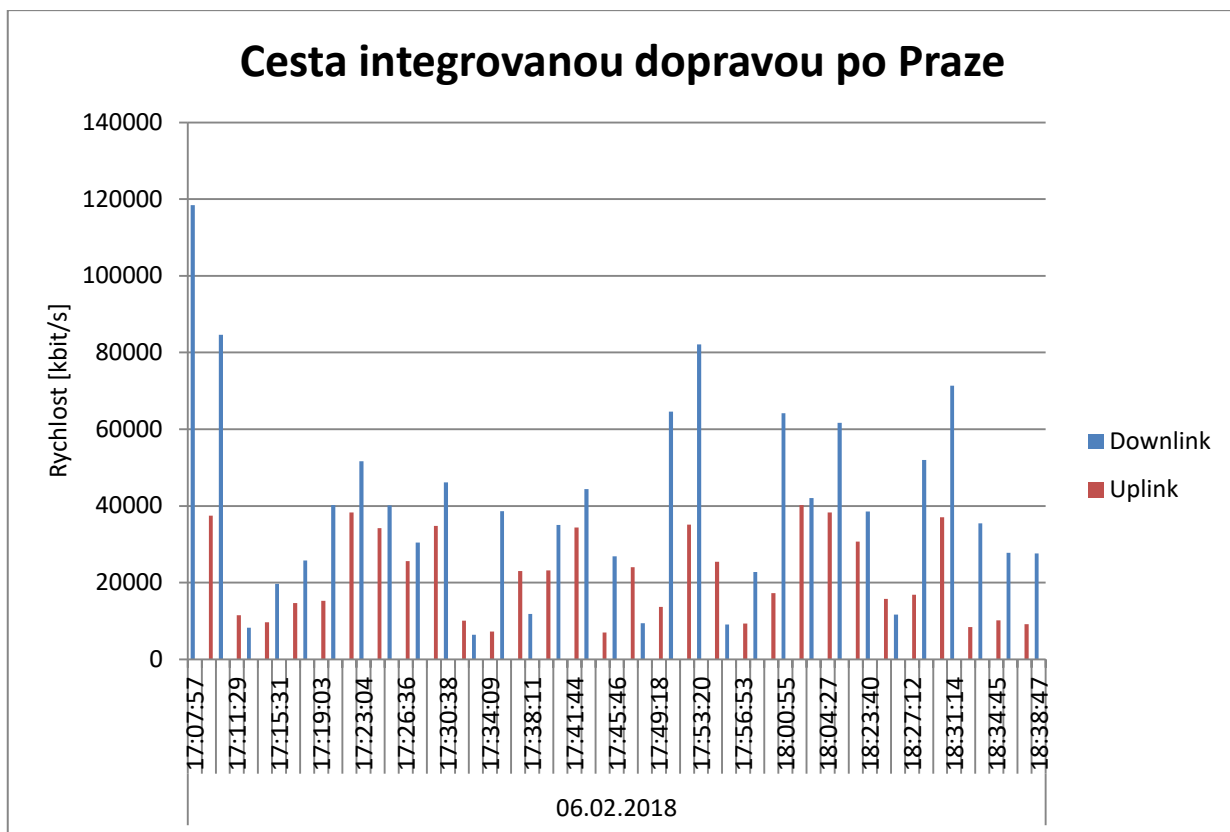


Obr. 27: Přenos uplink při cestě z Českých Budějovic do Prahy

Při dalším měření jsem se snažil dokázat, že se na většině míst v rámci města Prahy vyskytuje rychlá LTE mobilní síť. Byly tedy změřeny některé autobusové nebo

tramvajové linky, jejichž trasa vede buď přímo přes centrum, nebo se jedná spíše o spoje v okrajovějších částech Prahy. Vzhledem k tomu, že se jednalo o dodatkové měření, tak nebyly jednotlivé linky dopředu vytipované. Byly vybírány především linky při přesunu mezi nádražími kvůli měření vlakových tras nebo náhodné spoje, kterými osobně několikrát denně jezdím například do školy a zpět. Při této variantě bylo nejvýhodnější měřit zároveň downlink i uplink, jelikož nebyla plánována cesta tam a zpět. Všechna měření jsou popsána v tab. 6. Nutno říci, že při ani jedné cestě nedošlo k výpadku signálu, s čímž se dalo počítat. Rychlosti ve směru downlink se pohybovaly v rozmezí 7-60 Mbit/s, což je dostatečná rychlost pro přehrávání videí. Ve směru uplink se rychlost pohybovala v rozmezí 5-40 Mbit/s. I v tomto případě by daná rychlost měla většině lidem stačit a pravděpodobně by bylo možné při dolní hranici i streamovat videa. Při měření nebyl pozorován významný rozdíl v typu soupravy. Rušení signálu autobusy nebo tramvajemi bylo v podstatě nulové.

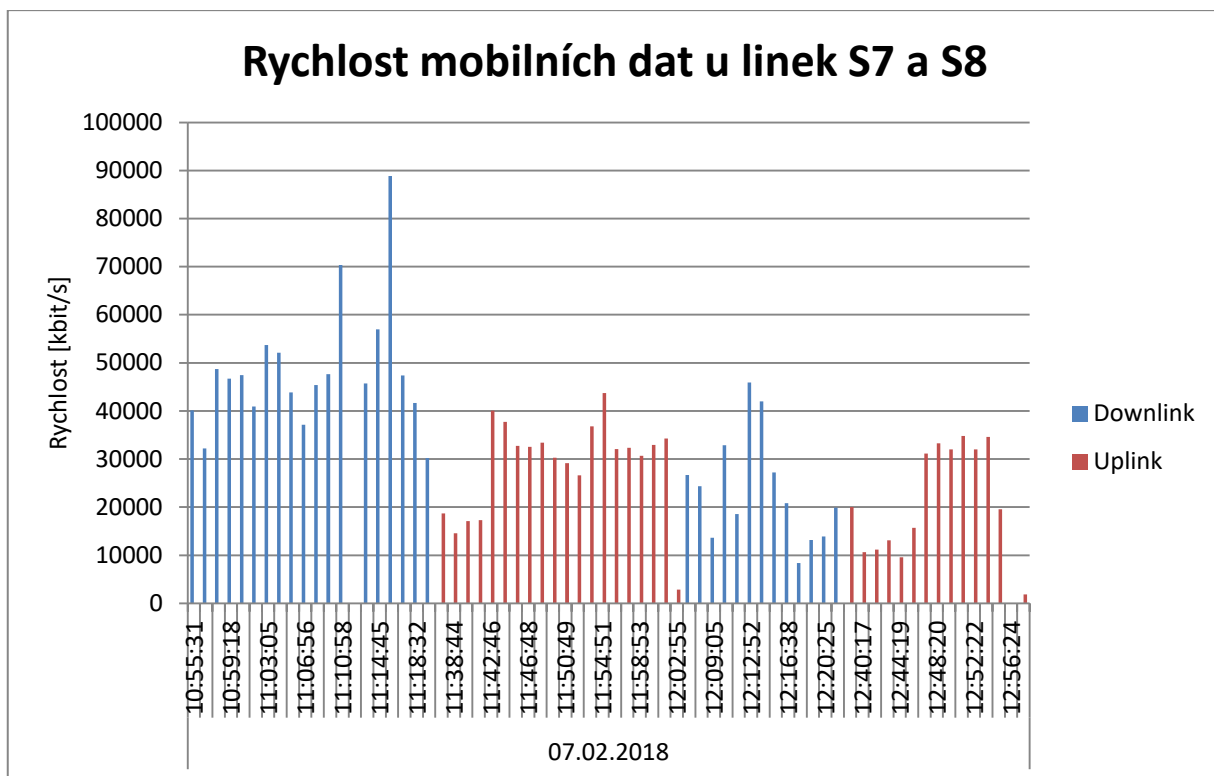
Jelikož vypadaly všechny grafy podobně, tak byla pro ilustraci v obr. 28 naznačena rychlost nejdříve v tramvaji 22 ze zastávky Bílá Hora do Hloubětína a následně v autobusu 182 ze zastávky Vysočanská na Spojovací. Z grafu lze vyčíst, že docházelo v určitých místech k poklesům a jinde naopak nárůstům rychlosti mobilních dat, což bylo pravděpodobně způsobeno okolními budovami či různými podjezdy. Dle mého názoru je rychlost mobilních dat při cestě městskou integrovanou dopravu v centru dostačující a cestující by neměli mít problém s připojením k internetu v žádné lince.



Obr. 28: Rychlost přenosu mobilních dat při cestě pražskou integrovanou dopravou v centru Prahy

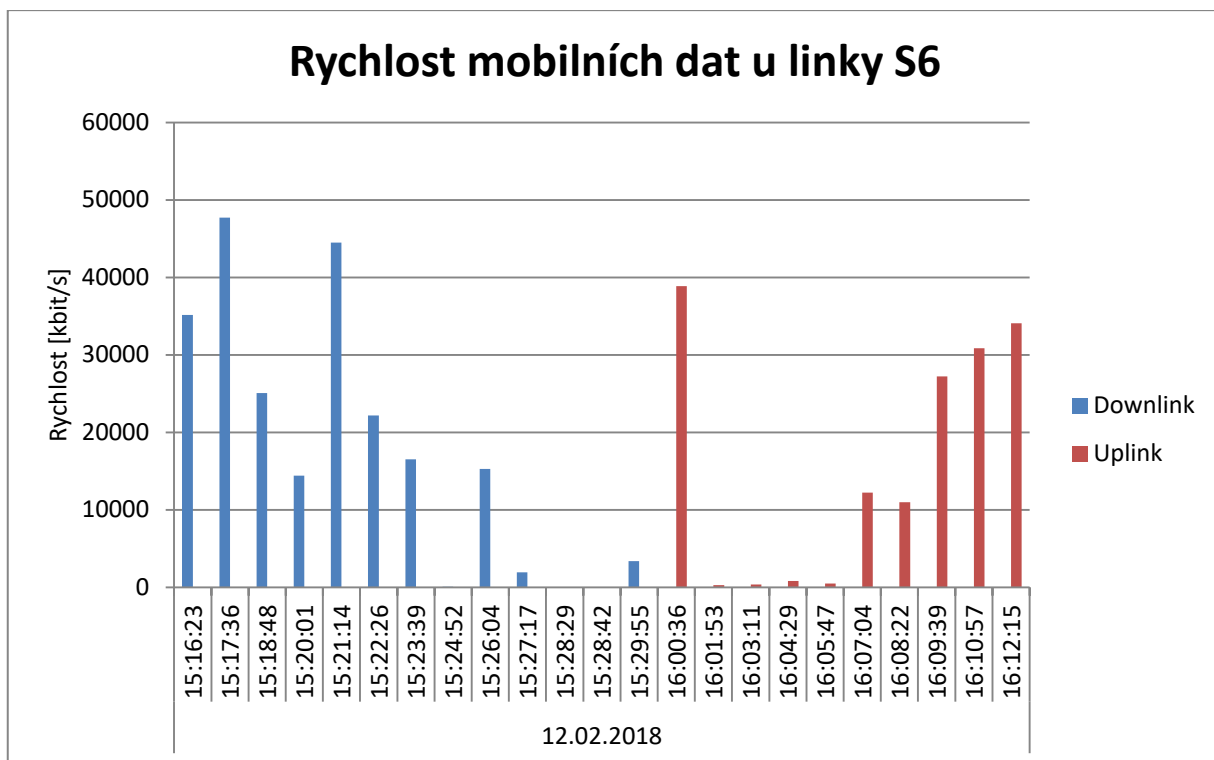
Po změření některých částí centra Prahy mi přišlo zajímavé se zaměřit na části okrajové. Proto jsem cestoval všemi vlakovými linkami S, kde byl předpoklad vyšší koncentrace lidí s připojením k mobilním datům. V tabulce chybí měření nejvytíženější linky S9. Tato linka byla změřena v rámci cesty do Českých Budějovic a zpět, jelikož se jedná o stejnou trasu.

První měření proběhlo 7. 2. 2018 a to konkrétně trasy linky S8 a S7. Linka S8 byla měřena do Zbraslavi od 10:55 do 12:05, zatímco linka S7 do Radotína od 12:07 do 12:58. U obou úseků nebyl žádný problém s výpadky signálu a například u linky S8 se rychlosti pohybovaly u downlinku mezi 30-60 Mbit/s a u uplinku mezi 15-40 Mbit/s. U linky S7 byly rychlosti downlinku a uplinku o něco nižší, avšak nikdy neklesly pod 10 Mbit/s, což je pro většinu služeb více než dostačující. Jednotlivé hodnoty lze vidět v obr. 29. U linky S7 si vysvětluji mírnější pokles rychlosti mobilních dat typem vlakové soupravy nebo tím, že se v daném úseku nachází nezalidněná místa se stíněním v podobě skal vedle kolejiště.



Obr. 29: Měření rychlosti mobilních dat u linek S7 a S8

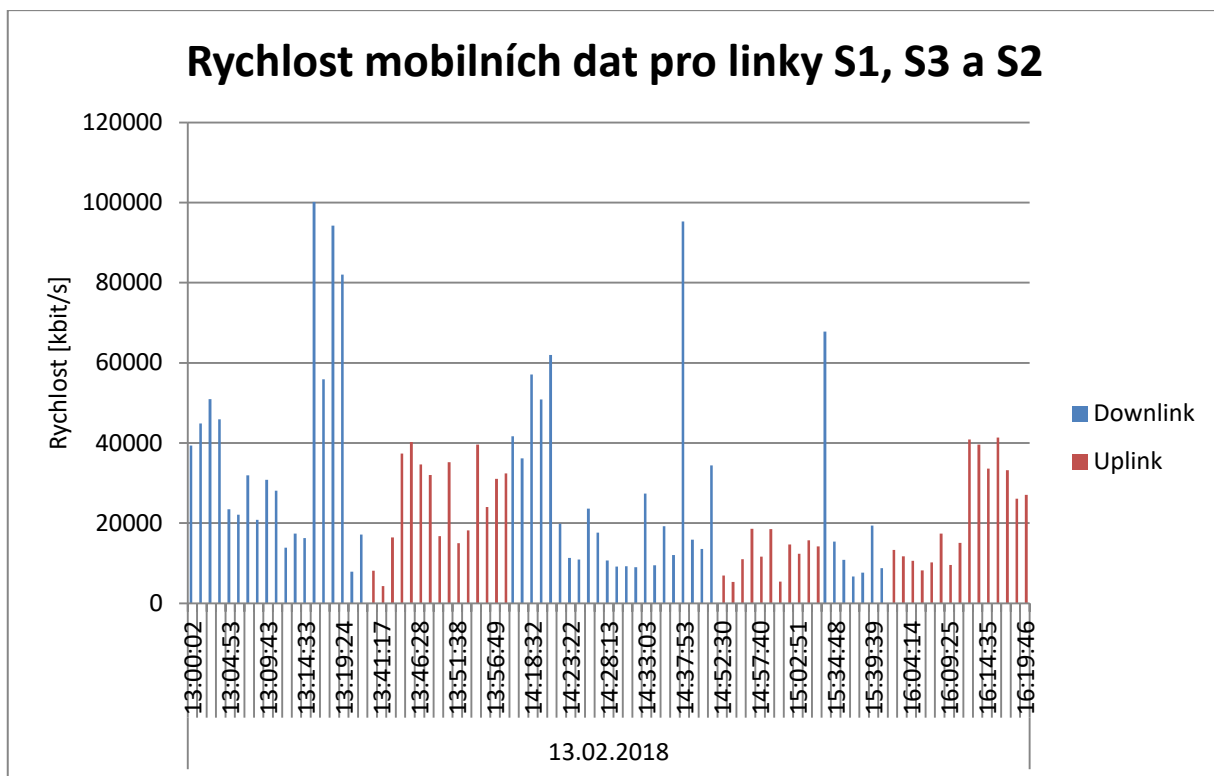
Další linka S6 do Řeporyjí a zpět byla změřena 12. 2. 2018. Tento úsek byl z hlediska poklesu rychlosti mobilních dat nejzajímavější. Přibližně v polovině trasy do Řeporyjí byl zaznamenán náhlý pokles rychlosti mobilních dat na skoro nulovou hodnotu, která se v podstatě držela až do cílové destinace. Nejlépe je tento úkaz vidět v obr. 30. Trasa vede skrz Prokopské údolí, které je hustě zalesněno v okolí trasy. To může být jednou z příčin výpadku signálu u operátora. Dále jde opět o typ vlakové soupravy, který se ovšem u této trasy nemění. Vysokou rychlost na začátku měření uplinku si vysvětlují tím, že bylo zapnuté měření na tento cyklus na nádraží v Řeporyjích, kde byli signál a rychlost mobilních dat nadprůměrné.



Obr. 30: Měření rychlosti mobilních dat u linky S6

Další 3 linky byly změřeny následující den 13. 2. 2018. Jednalo se o linky S1, S2 a S3. Zde byl výsledek v porovnání s linkou S6 o dost lepší. U žádného ze tří úseků nedošlo k úplnému výpadku signálu a minimum bylo připojení k EDGE. Linka S1, kde proběhlo měření do Klánovic, mi přišla velmi dobře zajištěná, co se týče rychlosti mobilních dat. Je to dle mého názoru z toho důvodu, že se jedná o jednu z hlavních tras v rámci České republiky a jezdí po ní i mezinárodní expresy. Kdyby v tomto úseku docházelo k výpadkům signálu, tak by to určitě nebyla nejlepší vizitka pro naši zemi. Druhá linka S2 (směrem do Horní Počernice) si ve vzdálenější polovině trasy od Masarykova nádraží držela stabilně rychlost downlinku i uplinku okolo 10 Mbit/s. Tato trasa je jedna z nevytěžovanějších tras v rámci linek S, ale i přesto nebyl zaznamenán žádný problémový úsek a tato rychlost přenosu mobilních dat je dostačující. U linky S3 do Čakovic jsem předpokládal větší pokles rychlosti mobilních dat, jelikož vlaková souprava představovala pouze jeden zastaralý motorový vůz a trasa nevede rušnými oblastmi. Nakonec jsem byl příjemně překvapený, jelikož nejnižší naměřená průměrná rychlost za cyklus byla přibližně 5 Mbit/s u uplinku, což je na původní předpoklad velmi slušné číslo.

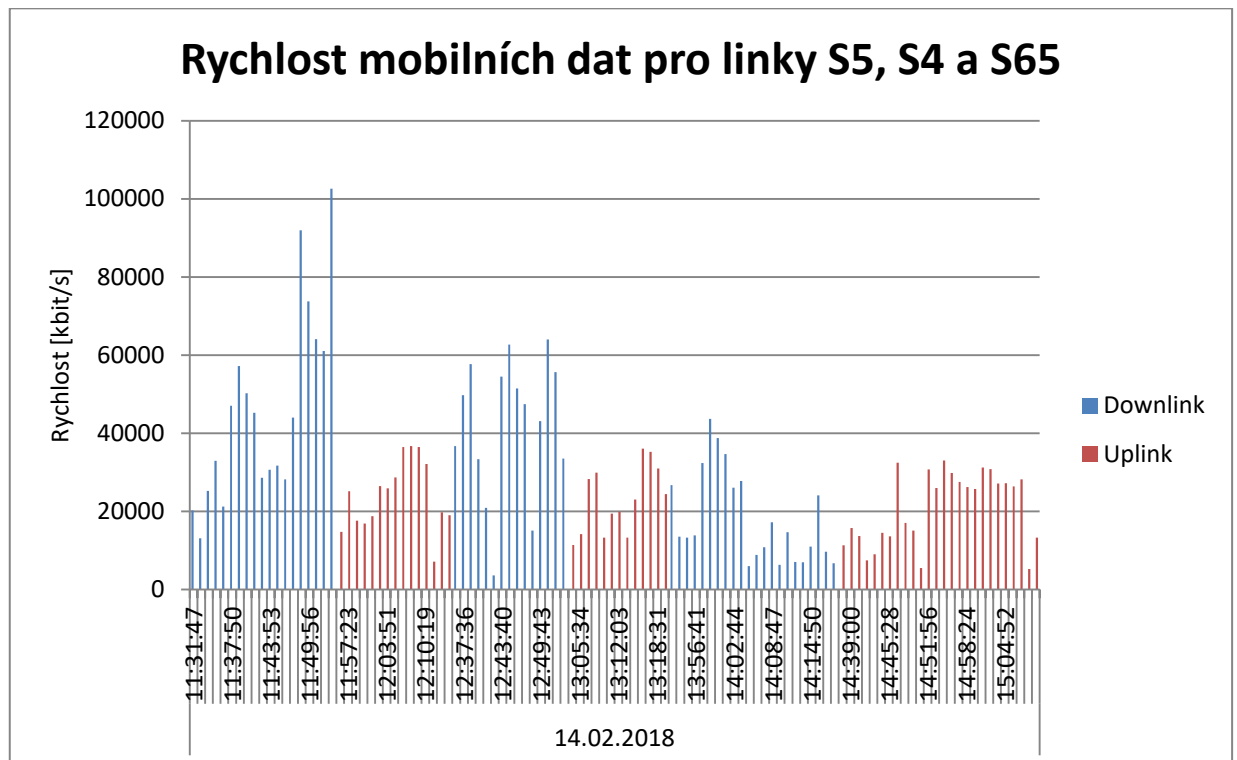




Obr. 31: Měření rychlosti mobilních dat postupně pro linky S1 (13:00-14:00), S3 (14:16-15:07) a S2 (15:33-16:21)

Poslední měřicí den vlakových souprav byl 14. 2. 2018. Tento den se měřily postupně linky S5, S4 a S65. První linka S5 se měřila ze stanice Bubny-Vltavská až do nádraží Ruzyně. Tento úsek vede z velké části centrálnější částí Prahy, tudíž byl předpoklad, že se rychlost bude pohybovat v nadprůměrných hodnotách. To se vzhledem k výsledkům potvrdilo a jediný pokles na 7 Mbit/s u uplinku byl zaznamenán poblíž pražské Stromovky. Jinak se hodnoty rychlosti mobilních dat pohybovaly nejčastěji okolo 20 Mbit/s. Druhá linka S4 byla změřena do zastávky Sedlec a zpět. Tato linka je jedna z vytěžovanějších tras v rámci všech linek S. Jediný zaznamenaný případ poklesu rychlosti mobilních dat byl při cestě do Sedlece v parku u Bulovky. Zde byla naměřena rychlost v průměru okolo 3,6 Mbit/s, což pro download je relativně na hraně a je možné, že v určitém místě tohoto parku dojde i k úplnému výpadku sítě, což může být problém například v případě stahování souboru. Třetí trasa linky S65 byla změřena do zastávky Zličín. Tato linka je nejméně vytížená ze všech pražských linek S. Na tuto trasu bývají nasazeny zastaralé motorové vlaky, jelikož je to pro České dráhy pravděpodobně neekonomičtější varianta. Tato trasa vede okolo Hlubočepských ploten a celkově vede z větší části mimo obydlené zóny. To se projevilo na rychlosti mobilních dat, kde například u Hlubočepských ploten bylo zaznamenáno sotva připojení EDGE. Celkové

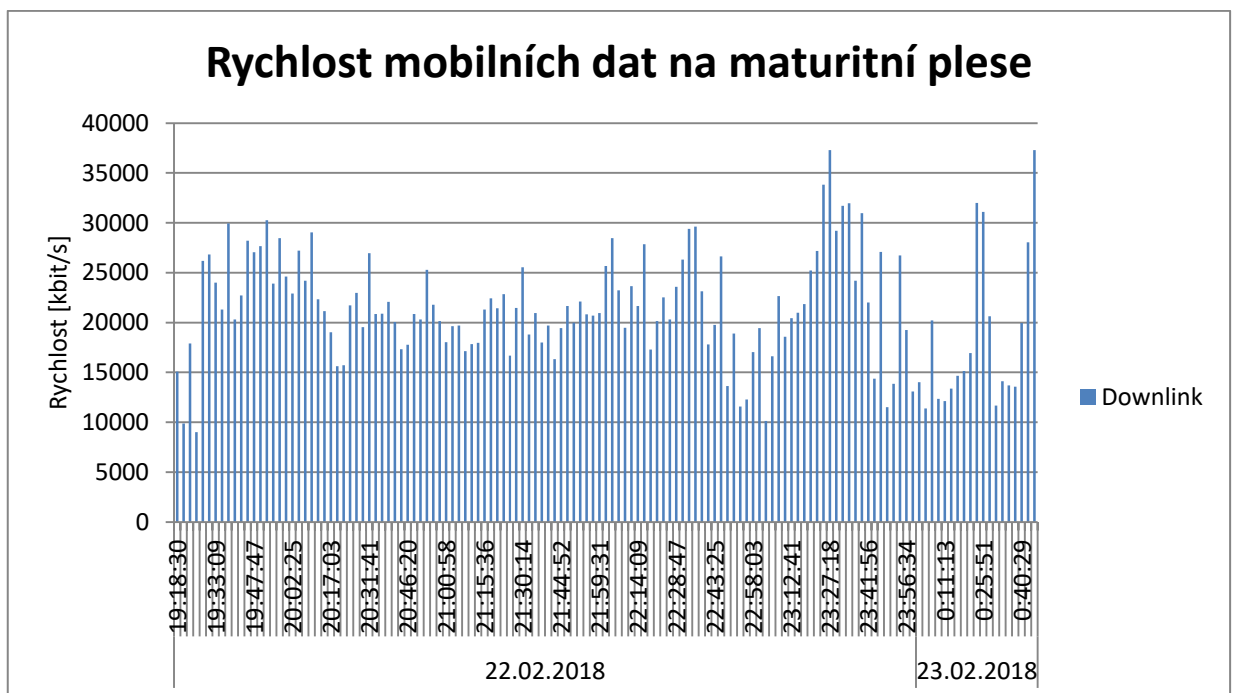
výsledky nebyly tak špatné, jelikož se průměrují hodnoty za jeden cyklus, avšak v některých místech došlo i ke krátkodobým výpadkům signálu. Tuto linku použije denně pouze okolo 600 cestujících, z nichž velká část využije tuto linku denně 2x. Vezmeme-li v úvahu, že služby mobilního internetu u O2 využívá přibližně 2,25 milionů obyvatel České republiky, tak se špatný signál v rámci této trasy týká odhadem 100 lidí denně. Z ekonomického hlediska se tedy pravděpodobně společnosti O2 nevyplácí na tuto trasu posilovat signál.



Obr. 32: Měření rychlosti mobilních dat postupně pro linky S5 (11:31-12:15), S4 (12:36-13:20) a S65 (13:53-15:11)

Po měření mobilního datového přenosu v Praze jsem se rozhodl, že by bylo zajímavé změřit nějakou společenskou akci v uzavřeném prostoru. Naskytl se mi příležitost navštívit maturitní ples v Českých Budějovicích. Ples se konal 22. 2. 2018 v kulturním domě Metropol a údajně byla naplněna maximální kapacita. Samotné měření ukázalo, že tento kulturní dům je skvěle přizpůsobený velkému množství lidí, z nichž většina používala mobilní zařízení, jelikož se jednalo o studenty. Po celou dobu se rychlost mobilních dat pohybovala v rozmezí 10-30 Mbit/s. V obr. 33 je naznačen vývoj rychlosti po celý večer. Byl měřen jak downlink, tak uplink, ale pro přehlednost jsem zvolil vyobrazení pouze rychlosti ve směru downlink. Jak je z obr. 33 vidět, v některých případech došlo k menším poklesům. První byl zaznamenán hned při příchodu na

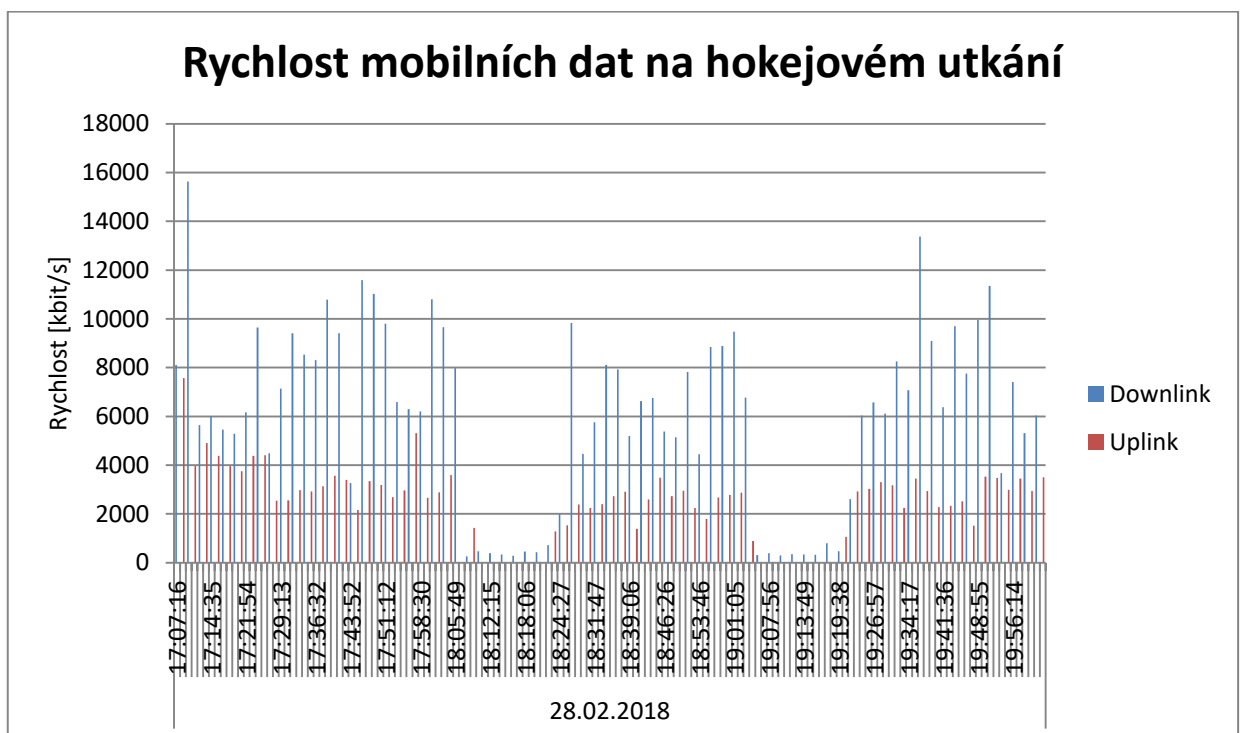
samotný ples. Vysvětluji si to tím, že bylo měření zapnuté již ve frontě v šatně, kde bylo stínění poněkud vyšší. Lehčí pokles se objevil okolo 20:17 a 20:40. To souviselo se slavnostním nástupem studentů, kdy na začátku pravděpodobně lidé točili a přeposílali videa nebo fotili fotky. Po skončení nástupu naopak lidé začali opět surfovat na internetu. Jeden z větších poklesů byl zaznamenán mezi 22:45 a 23:05. Popravdě nevím, co způsobilo daný pokles. Je možné, že v tento čas bylo vystoupení umělců na parketě nebo jsem se ocitl v místě kulturního domu se zhoršeným signálem. Poslední pokles nastal přesně po půlnočním vystoupení. Tento fakt byl pro mě relativně překvapující, jelikož v této chvíli většina lidí začíná tančit na parketě a mobilních zařízení si nevšímá. Má hypotéza je taková, že lidé natáčeli půlnoční překvapení a poté se o to podělili se svými kamarády prostřednictvím sociálních sítí. Po 15 minutách se opět signál ustálil na hodnotách okolo 15 Mbit/s. Jak již bylo zmíněno, kulturní dům Metropol je skvěle připraven na akce podobné maturitnímu plesu, co se týče pokrytí sítě mobilním operátorem O2.



Obr. 33: Měření rychlosti mobilních dat v kulturním domě Metropol na maturitním plesu

V Českých Budějovicích se konalo i další měření. Tentokrát šlo o hokejové utkání v Budvar aréně, která má kapacitu 6421 diváků. Na toto utkání si našlo cestu přes 5800 diváků, a když se vezmou v potaz zaměstnanci, tak se na hokejovém utkání nacházelo přes 6000 lidí. Již během první třetiny byl pozorován pokles rychlosti mobilních dat například oproti kulturnímu domu Metropol. Rychlost se pohybovala v rozmezí 2-12

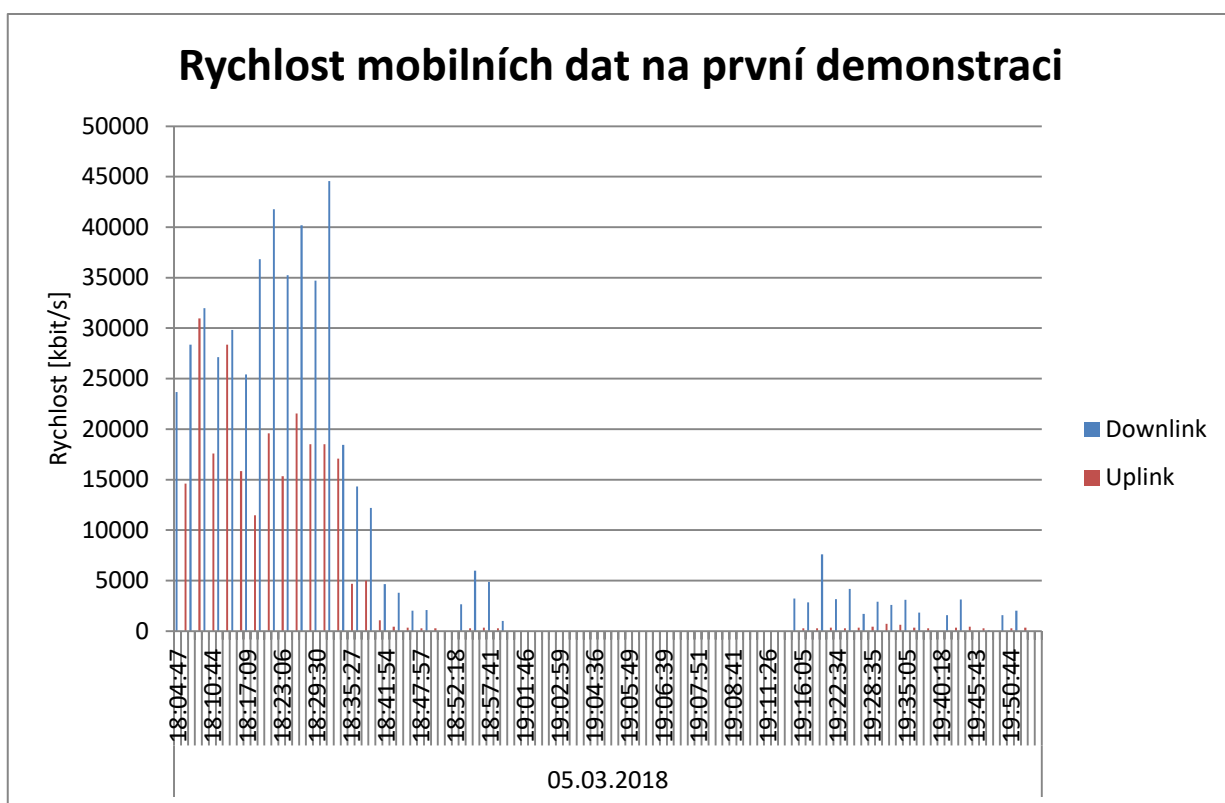
Mbit/s, jak je vidět na obr. 34. Ve chvíli, kdy skončila první třetina, se rychlost mobilních dat velkým skokem snížila. V pauze se rychlost ve směru downlink pohybovala do 500 kbit/s a ve směru uplink byla dokonce nulová. Bylo tedy zjištěno, že Budvar aréna není oproti kulturnímu Metropol připravena na množství lidí, které je v souladu s kapacitou budovy. Vzhledem ke skutečnosti, že jsem po celou dobu seděl na stejném místě, by bylo zajímavé proměřit celý stadion, kdy se bude jistě v každé části stadionu rychlost mobilních dat lišit. Mnou změřené hodnoty ovšem považuji za průměr vzhledem k místu, kde jsem seděl.



Obr. 34: Měření rychlosti mobilních dat na hokejovém utkání v českobudějovické Budvar aréně

Poslední 2 měření jsem se pokusil najít vhodné akce, kde se sejde větší množství lidí a zároveň využívají mobilní data. Jak již bylo zmíněno v předchozích dvou podkapitolách, zúčastnil jsem se dvou demonstrací na Václavském náměstí v centru Prahy. První demonstrace se odehrála 5. 3. 2018. Jednalo se o větší demonstraci a konala se v dolní části Václavského náměstí. V úvodu měření (přibližně od 18:00 do 18:30) jsem se nacházel spíše v horní polovině Václavského náměstí. V té době se rychlost mobilních dat pohybovala mezi 10 a 40 Mbit/s. Po 18:30 jsem se rozhodl vydat do hlavního davu tak, abych byl co nejvíce v centru lidí. V tu chvíli se rychlost mobilních dat okamžitě zmenšila na v podstatě nulovou hodnotu a po přibližně 20 minutách dokonce kompletně vypadl signál operátora O2. Po komunikaci s několika

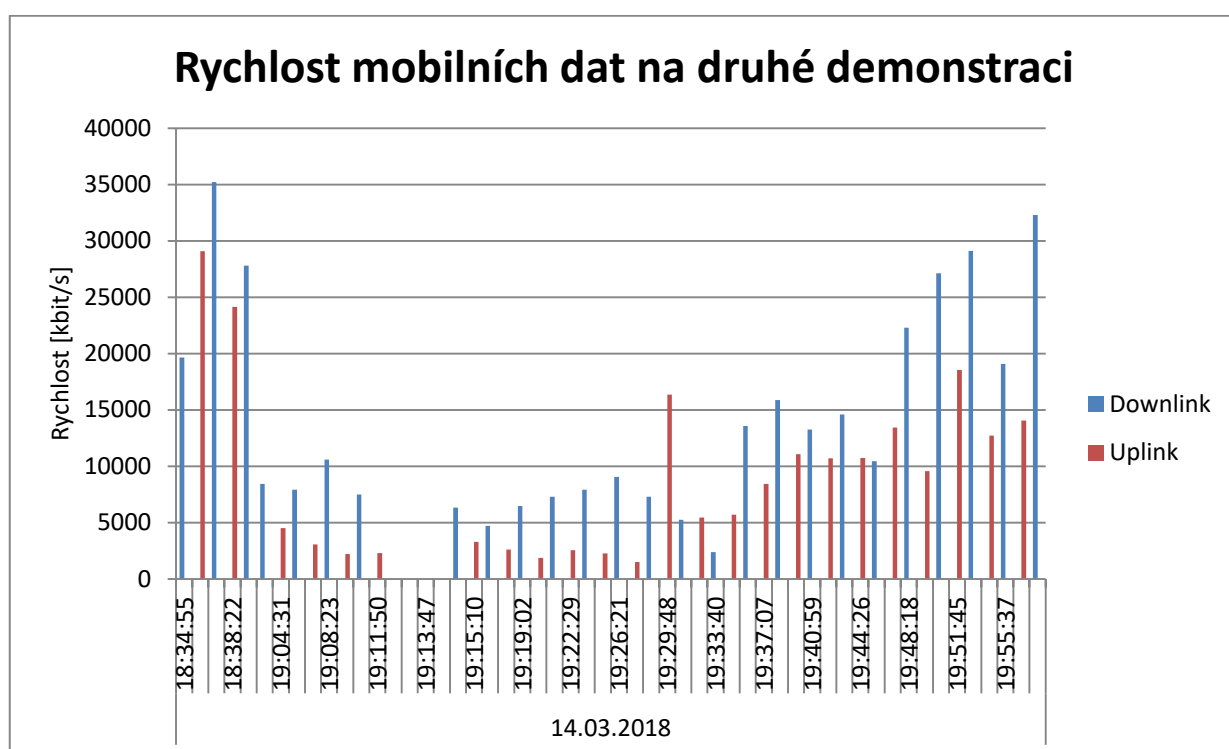
lidmi okolo mě jsem se dozvěděl, že výpadek signálu se týkal všech hlavních českých operátorů (například T-Mobile či Vodafone). Nebylo možné se nikam ani dovolat nebo se neodesílaly SMS zprávy. Pokusil jsem se restartovat mobilní terminál, ale ani to ničemu nepomohlo. Jediné východisko z této situace bylo přesunutí se z hlavního davu do méně zahuštěného místa na Václavském náměstí, kde se opět signál po chvíli objevil. Jeho rychlost je na obr. 35 vidět v rozmezí 19:15-19:54. Tato rychlost byla dostačující pro základní funkce mobilního zařízení, avšak připojení k internetu bylo pořád slabé. Otázka je, jestli mohli mobilní operátoři dopředu tušit, že k něčemu podobnému dojde, aby zabránili kompletnímu výpadku sítě. Každopádně by bylo dobré se pokusit něčemu podobnému do příště předejít.



Obr. 35: Měření rychlosti mobilních dat při první demonstraci na Václavském náměstí

Druhá demonstrace se oproti předchozí lišila v několika bodech. Prvním z nich je přemístění na horní část Václavského náměstí k soše svatého Václava. Druhou změnou byla minimálně o polovinu menší účast demonstrantů, což se projevilo na zatížení sítě. Třetí změnou byla reakce operátora O2 na předchozí demonstraci, kdy byly přidány licence z důvodu rozproštění spektra signálu pro více zařízení. Z obr. 36 lze pozorovat, že na úvod byla rychlost mobilních dat na běžné úrovni, co se Václavského náměstí týče. Jednalo se o přesun z tramvajové zastávky do hlavního davu lidí. Od přibližně

19:00 se opět začala v centru davu snižovat rychlost a signál byl velmi špatný. Oproti předchozí demonstraci nebyl ovšem pokles natolik radikální, aby nebylo možné volat nebo posílat SMS zprávy. Jediný výpadek byl zaznamenán mezi 19:10 a 19:15, kdy se na demonstraci nacházelo největší množství lidí. Dále je vidět, jak se postupně lidé rozcházejí, až na konec je rychlost mobilních dat srovnatelná s úplným začátkem měření. Tato demonstrace tedy z hlediska datového přenosu vyzněla mnohem lépe, než ta předchozí. Zajímavé by bylo zjistit, do jaké míry za to mohli přidané licence od operátora nebo to, že se na této demonstraci nacházelo znatelně méně lidí. Dle mého názoru hrála roli kombinace obou změn.



Obr. 36: Měření rychlosti mobilních dat při druhé demonstraci na Václavském náměstí

### 7.3.2 Návrh míst na posílení signálu

Posílení signálu mnohdy nezáleží pouze na samotném operátorovi. Omezujících faktorů je celá řada od technických po legislativní. Nezanedbatelný vliv má finanční rentabilita. Operátor v takovém případě nemá přímý nebo okamžitý finanční zisk. Potenciálním přínosem je zlepšení reputace a spokojenost zákazníků, kteří sice za služby operátora platí stejně, ale zvyšuje se loajalita, povědomí vyšší kvality, spolehlivosti služeb atd. Ročně se koná přibližně několik desítek akcí, kde se rozhodne operátor posílit síť dočasnými základnovými stanicemi. Posílení lokality na všech sítích (2G, 3G a 4G)

představuje jednorázový výdaj řádově cca 100 tisíc Kč. Jedná se tedy spíše obchodní a marketingové rozhodnutí. Navýšení kapacity lze také provést zvětšením počtu licencí na lokalitě nebo lokalitách. Zde samozřejmě nelze mluvit o radikálním zlepšení služby a datová (rádiová) kapacita se pouze přerozdělí mezi větší počet terminálů. Ale i to může být pro zachování funkčnosti služeb na určité úrovni velmi významné. Každý operátor samozřejmě využívá jednotlivých lokalit průběžně sleduje, vyhodnocuje a případně následně posiluje, ale to nemusí být dostatečně účinné v místech nepredikovatelných krátkodobých koncentrací terminálů. Samozřejmě dalším důvodem pro posílení lokality je aktivní negativní reakce zákazníků, resp. početnější nebo opakované stížnosti zákazníků v konkrétním místě na nedostupnost nebo degradaci služeb.

Z výsledků měření vyplynulo, že většina naměřených hodnot je v pořádku a operátor na daných místech poskytuje odpovídající kvalitu služeb. Jediné dvě problematické výsledky byly zaznamenány nejprve na hokejovém utkání v českobudějovické Budvar aréně a následně na dvou demonstracích konajících se na Václavském náměstí v centru Prahy.

V prvním případě se jedná o místo, kde by měla být vybudovaná již síť pro dostatečné pokrytí sportovních či kulturních akcí, které se zde pravidelně opakují. Jak je patrné z naměřených hodnot, tak při naplnění tohoto stadionu může snadno dojít k výpadkům sítě. Kritickým problémem nedostupnosti služeb může být, že se není možné dovolat ani na tísňovou linku. Pro tísňové volání by měl terminál sestoupit do 2G sítě, ale v okamžiku primární signalizace MT s BTS nedostane prioritou. To je ale bez vlivu na využití nodeB nebo enodeB, tedy nezávislé na konzumaci dat a rádiových prostředků mobilními terminály ze sítí 3G a 4G. Zde by se ovšem měl operátor domluvit s provozovatelem zařízení (stadionu), případně náklady na posílení sdílet, tak aby bylo dosaženo všech zákonných nařízení i lokálních opatření provozovatele. Provozovatel má povinnost zajištění bezpečnostních předpisů na stadionu a věřím, že se v Budvar aréně nachází alespoň několik fixních telefonů v případě nouze. Zlepšení signálu a s tím související rychlosti mobilních dat by v tomto případě bylo dobré, avšak samotné společnosti O2 by se to z finančního hlediska na pokrytí pouze přestávek mezi třetinami utkání zřejmě nevyplatilo. Jediným možným způsobem by byl příspěvek od provozovatele stadionu. V Budvar aréně je zlepšení signálu pravděpodobně v nedohlednu, jelikož podle mých informací nedochází ke stížnostem na výpadky signálu

v aréně. Navíc se snaží provozovatel spíš v posledních letech zlepšit WIFI síť, která je v současnosti velmi nestabilní.

V druhém případě, tedy masové demonstrace v prostoru pražského Václavského náměstí byla degradace datových služeb významná, až po úplnou nedostupnost. Potenciálně se jedná o příležitost pro operátory, kde by měli pokrytí krátkodobě zlepšit. Nicméně dostupnost služeb byla vyhovující v blízkém okolí a to logicky platí i pro případné tísňové volání.



## 8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat rychlost přenosu dat v mobilní síti operátora O2 Czech Republic a. s. v různých místech a při různých situacích a následně doporučit, kde by bylo z ekonomického hlediska a z hlediska spokojenosti zákazníků výhodné posílit síť v dané lokalitě.

V současné době je pokrytí na území České republiky všemi hlavními operátory velmi dobré a na většině území funguje již i síť LTE. Proto bylo najít místa, kde se denně nachází větší množství lidí a není pokrytí signálem, velmi obtížné. Při cestování vlakem v rámci integrované dopravy města Prahy, ani při cestě do Českých Budějovic, nedošlo k výrazným problémům. Slabší signál a s tím spojená nižší rychlost při přenosu dat se projevily při hokejovém utkání v Českých Budějovicích a během dvou demonstrací na Václavském náměstí v Praze. V případě hokejového utkání by se měl majitel stadiónu v případě nespokojenosti návštěvníků zápasů domluvit s operátory na způsobu zlepšení mobilní infrastruktury. V druhém případě se jedná o otevřené prostranství, kde zodpovídají za výpadek signálu operátoři. Václavské náměstí je z pohledu mobilního přenosu datového signálu přizpůsobeno na vyšší koncentraci osob, avšak nikoli na extrémní nápor desetitisíc lidí navíc při demonstraci. Problém nastává, kdy se zákazník nemůže nikam dovolat, což dokonce v případě blokace tísňového volání může způsobit velké problémy pro operátora. V tomto případě bych operátorům doporučil, aby přijali vhodná technická opatření např. nasadit mobilní základnové stanice navíc nebo přidat ještě více licencí pro rozprostření spektra více terminálům, k čemuž došlo při měření druhé demonstrace.

Bakalářská práce mi dala hodně nových znalostí, zkušeností a díky cestám vlakovými soupravami jsem objevil i krásná místa, na která bych se možná nikdy nepodíval. Při zpracovávání teoretické části jsem se dozvěděl mnoho nových poznatků o vývoji mobilních sítí a zároveň o tom, jaké mobilní sítě se v České republice v současnosti používají a jaké se budou používat v horizontu několika let. Tyto znalosti byly následně využity při praktické části. Při přípravě měření rychlosti mobilních dat jsem získal mnoho zkušeností a nových poznatků od konzultantů ze společnosti O2 Czech Republic a. s., kteří mě zasvětili částečně i do chodu této společnosti. Z práce se zaměstnanci z O2 Czech Republic a. s. jsem nadšený, jelikož mám nové kontakty, které bych rád

případně využil například při volbě mé práce po dokončení inženýrského studia nebo při možném navázání této bakalářské práce na diplomovou.

# Literatura

1. *Overview of Advances in Communication*. **Kumar, Anil a Rao, Trinatha**. Visakhapatnam, India : IEEE, 2015. 978-1-5090-5351-3.
2. **Bečvář, Zdeněk, Mach, Pavel a Pravda, Ivan**. *Mobilní síť*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2014. 978-80-01-05305-8.
3. **Richtr, Tomáš**. Technologie pro mobilní komunikaci. *Princip buňkového systému*. [Online] [Citace: 1. březen 2018.] <http://tomas.richtr.cz/mobil/bunk-princip.htm>.
4. **Bumbálek, Zdeněk**. Modulační techniky v moderních bezdrátových sítích. [Online] 8. Únor 2010. <http://access.fel.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cisloclanku=2010020004>.
5. **Bezpalec, Pavel**. *LTE (Long Term Evolution)*. Praha : České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2017. 978-80-01-06291-3.
6. *Overview of 5G requirements and future wireless networks*. **Mattisson, Sven**. Leuven, Belgium : IEEE, 2017. 978-1-5090-5025-3.
7. *Overview of 5G security in 3GPP*. **Xiaowei Zhang, Andreas Kunz, Stefan Schröder**. Helsinki, Finland : IEEE, 2017. 978-1-5386-3070-9.
8. **Ericsson**. *Ericsson Mobility Report*. [Online] Únor 2018. <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/emr-interim-feb-2018.pdf>.
9. **Nakamura, Takaharu**. LTE-Advanced (3GPP Release 10 and beyond). *3GPP*. [Online] Prosinec 2009. [ftp://www.3gpp.org/workshop/2009-12-17\\_ITU-R\\_IMT-Adv\\_eval/docs/pdf/REV-090006.pdf](ftp://www.3gpp.org/workshop/2009-12-17_ITU-R_IMT-Adv_eval/docs/pdf/REV-090006.pdf).
10. ČVUT, FEL: Techpedia. *E-UTRAN*. [Online] <http://techpedia.fel.cvut.cz/html/frame.php?oid=89&pid=1007&finf=&fp=>.

## Seznam obrázků

Obr. 1: Obsluhovaná oblast rozdělena do svazků (clusterů) a buněk

Zdroj: **Bečvář, Zdeněk, Mach, Pavel a Pravda, Ivan.** *Mobilní sítě.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. 978-80-01-05305-8., str. 16

Obr. 2: Přístupové metody FDMA, TDMA a CDMA

Zdroj: **Bečvář, Zdeněk, Mach, Pavel a Pravda, Ivan.** *Mobilní sítě.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. 978-80-01-05305-8., str. 19

Obr. 3: Architektura sítě GSM

Zdroj: <https://www.slideshare.net/abhishekshringi/gsm-architecture-11984082>, slide 3

Obr. 4: Princip technologie HSCSD

Zdroj: [https://www.researchgate.net/figure/GSM-HSCSD-network-architecture\\_fig1\\_44127340](https://www.researchgate.net/figure/GSM-HSCSD-network-architecture_fig1_44127340)

Obr. 5: Princip technologie GPRS

Zdroj: **Bečvář, Zdeněk, Mach, Pavel a Pravda, Ivan.** *Mobilní sítě.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. 978-80-01-05305-8., str. 44

Obr. 6: Princip technologie EDGE

Zdroj: **Bečvář, Zdeněk, Mach, Pavel a Pravda, Ivan.** *Mobilní sítě.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. 978-80-01-05305-8., str. 46

Obr. 7: Architektura sítě UMTS

Zdroj: <http://slideplayer.com/slide/6009610/>, slide 27

Obr. 8: Rozdíl mezi OFDM a OFDMA

Zdroj: **Bumbálek, Zdeněk.** Modulační techniky v moderních bezdrátových sítích, url: <http://access.fel.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cisloclanku=2010020004>

Obr. 9: Podrobná architektura sítě LTE

Zdroj: **Bezpalec, Pavel.** LTE (Long Term Evolution), Praha: České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2017. 978-80-01-06291-3, str. 12

Obr. 10: Vývoj rychlosti mobilních sítí za posledních 12 let

Obr. 11: Vývoj generací celulárních sítí skupinou 3GPP

Zdroj: Overview of 5G requirements and future wireless networks, **Mattisson, Sven.**  
Lauven, Belgium, IEEE, 2017. 978-1-5090-5025-3, str. 1

Obr. 12: Příklady zařízení v IoT

Zdroj: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things/>

Obr. 13: Rozdělení mobilních zařízení v roce 2016 a 2022 dle jednotlivých generací

Zdroj: Overview of 5G requirements and future wireless networks, **Mattisson, Sven.**  
Lauven, Belgium, IEEE, 2017. 978-1-5090-5025-3, str. 2

Obr. 14: Jednoduché schéma network slicing v 5G

Zdroj: <https://www.clickx.be/nieuws/164266/5g-het-ultieme-mobiele-netwerk/>

Obr. 15: Porovnání využití aplikací v roce 2016 a odhad pro rok 2022

Zdroj: Overview of 5G requirements and future wireless networks, **Mattisson, Sven.**  
Lauven, Belgium, IEEE, 2017. 978-1-5090-5025-3, str. 2

Obr. 16: Výskyt mobilních zařízení v jednotlivých místech na Zemi

Zdroj: <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2018/emr-interim-feb-2018.pdf>

Obr. 17: Mapa pokrytí mobilní sítě společností O2 v České republice

Zdroj: <https://www.o2.cz/>

Obr. 18: Čtvrtý železniční koridor v ČR

Zdroj: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Čtvrtý\\_železniční\\_koridor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Čtvrtý_železniční_koridor)

Obr. 19: Spouštění předdefinovaného měření kvality datového přenosu a nastavení pauzy k synchronizaci

Zdroj: Aplikace QualiPoc

Obr. 20: Jednotlivé typy měření na obrázku

Zdroj: Aplikace QualiPoc

Obr. 21: Tlačítko na zastavení měření

Zdroj: Aplikace QualiPoc

Obr. 22: Tok změřených rychlostí v rámci měření download

Zdroj: Aplikace QualiPoc

Obr. 23: Přehled výsledků podle času měření

Zdroj: Aplikace QualiPoc

Obr. 24: Příklad kvality měření v závislosti na poloze

Zdroj: Aplikace QualiPoc

Obr. 25: Přehled tras v rámci pásma P, 0 a B (označeno bílou barvou), které byly změřeny

Zdroj: <https://pid.cz>

Obr. 26: Přenos downlink při cestě z Prahy do Českých Budějovic

Obr. 27: Přenos uplink při cestě z Českých Budějovic do Prahy

Obr. 28: Rychlost přenosu mobilních dat při cestě pražskou integrovanou dopravou v centru Prahy

Obr. 29: Měření rychlosti mobilních dat u linek S7 a S8

Obr. 30: Měření rychlosti mobilních dat u linky S6

Obr. 31: Měření rychlosti mobilních dat postupně pro linky S1, S3 a S2

Obr. 32: Měření rychlosti mobilních dat postupně pro linky S5, S4 a S65

Obr. 33: Měření rychlosti mobilních dat v kulturním domě Metropol na maturitním plese

Obr. 34: Měření rychlosti mobilních dat na hokejovém utkání v českobudějovické Budvar aréně

Obr. 35: Měření rychlosti mobilních dat při první demonstraci na Václavském náměstí

Obr. 36: Měření rychlosti mobilních dat při druhé demonstraci na Václavském náměstí