

Česká zemědělská univerzita v Praze

Provozně ekonomická fakulta

Katedra informačních technologií



Diplomová práce

Mobilní datové sítě ve vybraných lokalitách ČR

Bc. Aleš Durdil

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Aleš Durdil

Informatika

Název práce

Mobilní datové sítě ve vybraných lokalitách ČR

Název anglicky

Mobile data networks in selected localities of the Czech Republic

Cíle práce

Hlavním cílem práce je zhodnotit aktuální stav mobilních datových sítí ve vybraných lokalitách České republiky.

Dílní cíle:

- zpracovat teoretická východiska relevantní k řešené problematice s důrazem na historický a zejména současný technologický vývoj
- navrhnout vhodný postup měření a vybrat nejdůležitější veličiny ke sledování
- provést měření a sběr dat o mobilním datovém připojení v předem vybraných lokalitách za účelem následného vyhodnocení
- analyzovat získané výsledky měření a na základě nich formulovat závěry

Metodika

Metodika řešení teoretické části diplomové práce bude založena na studiu a analýze odborných informačních zdrojů. Na základě znalostí získaných v teoretické části práce budou v praktické části navržena a provedena vlastní měření, která budou sloužit k praktickému porovnání aktuálního stavu mobilního datového připojení ve vybraných lokalitách České republiky dle předem určených parametrů. Data získaná během experimentálního měření budou následně pomocí vhodných nástrojů a metod vyhodnocena. Na základě syntézy poznatků teoretické části a vyhodnocení výsledků praktické části budou formulovány závěry práce.

Doporučený rozsah práce

60 – 70 stran

Klíčová slova

mobilní internet, datové sítě, rychlost připojení, operátor, GPRS, EDGE, UMTS, 4G, 5G

Doporučené zdroje informací

Computer: Žijte digitálním světem. Czech News Center, 1994-. ISSN 1210-8790.

CURWEN, Peter a Jason WHALLEY, 2021. Understanding 5G Mobile Networks: A Multidisciplinary Primer [online]. Bingley: Emerald Publishing Limited [cit. 2023-06-29]. ISBN 9781800710368. Dostupné z: databáze Proquest

PETERKA, Jiří. Počítačové sítě. E-archiv [on-line]. 2023. Dostupné z WWW <<http://www.earchiv.cz>

PUŽMANOVÁ, Rita, 2004. Širokopásmový Internet: přístupové a domácí sítě. Brno: Computer Press. ISBN 80-251-0139-8.

SAUTER, Martin, 2021. From GSM to LTE-Advanced Pro And 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband [online]. 4th. Newark: Wiley [cit. 2023-06-29]. ISBN 9781119714705. Dostupné z: databáze Proquest

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – PEF

Vedoucí práce

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra informačních technologií

Elektronicky schváleno dne 19. 7. 2023

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 11. 2023

doc. Ing. Tomáš Šubrt, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Mobilní datové sítě ve vybraných lokalitách ČR" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 15. 3. 2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení po celou dobu zpracování bakalářské práce. Dále poděkování směřuji rodině a svým blízkým za neustálou podporu během studia

Mobilní datové sítě ve vybraných lokalitách ČR

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou mobilních datových sítí se zaměřením na konkrétní lokality v rámci okresu Příbram. Jejím hlavním cílem je zhodnotit aktuální stav přenosové infrastruktury a možnosti připojení k internetu v celkem 29 obcích napříč regionem. Za tímto účelem jsou v teoretické části detailně popsány základní principy fungování celulárních sítí, rozdíly mezi dostupnými technologiemi a také postupný historický vývoj s důrazem na Českou republiku.

V praktické části jsou získané poznatky využity k návrhu vhodného postupu měření, během něhož jsou třemi softwarovými nástroji zaznamenávány předem vybrané parametry připojení k internetu. Sesbíraná data slouží jako podklad pro následnou komplexní analýzu na několika úrovních. Za pomoci vhodných statistických nástrojů jsou slovně i graficky zhodnoceny nejdůležitější aspekty, které mají vliv na konečné výsledky. Jedná se především o vzdálenost k vysílači, použitou technologii a frekvenční pásmo. Srovnání se týká výhradně tří hlavních poskytovatelů mobilních služeb v ČR, kteří mají dohromady většinový tržní podíl. Na základě provedené analýzy jsou stanoveny relevantní závěry a doporučení, která by mohla vést k odstranění zjištěných nedostatků.

Klíčová slova: mobilní internet, datové sítě, rychlost připojení, operátor, GPRS, EDGE, UMTS, 4G, 5G

Mobile data networks in selected localities of the Czech Republic

Abstract

The thesis deals with the issue of mobile data networks with a focus on specific locations within the Příbram district. Its main objective is to evaluate the current state of the transmission infrastructure and the possibilities of Internet connection in a total of 29 municipalities across the region. To this end, the theoretical part describes in detail the basic principles of cellular networks, the differences between the available technologies and the gradual historical development with an emphasis on the Czech Republic.

In the practical part, the acquired knowledge is used to design a suitable measurement procedure, during which three software tools are used to record pre-selected parameters of the Internet connection. The collected data serve as a basis for subsequent complex analysis at several levels. Using appropriate statistical tools, the most important aspects affecting the final results are evaluated verbally and graphically. These are mainly the distance to the transmitter, the technology used and the frequency band. The comparison concerns exclusively the three main mobile service providers in the country, which together have the majority market share. On the basis of the analysis carried out, relevant conclusions and recommendations are set out which could lead to the elimination of the identified shortcomings.

Keywords: mobile internet, data networks, connection speed, operator, GPRS, EDGE, UMTS, 4G, 5G

Obsah

1	Úvod.....	13
2	Cíl práce a metodika	14
2.1	Cíl práce.....	14
2.2	Metodika	14
3	Přehled řešené problematiky.....	15
3.1	Historie přenosu informace a vzniku mobilních sítí.....	15
3.2	Historie Internetu	17
3.3	Historie Internetu V ČR.....	21
3.4	Mobilní síť první generace	26
3.5	Mobilní síť druhé generace.....	29
3.5.1	Architektura GSM sítě	30
3.5.2	Technické specifikace GSM	33
3.5.3	Přenos dat v GSM.....	35
3.5.4	GPRS a EDGE.....	36
3.5.5	Sítě druhé generace v ČR.....	39
3.6	Mobilní síť třetí generace	41
3.6.1	Technické specifikace UMTS	42
3.6.2	Architektura sítě.....	43
3.6.3	HSDPA.....	44
3.6.4	HSUPA.....	45
3.6.5	HSPA+	45
3.7	Mobilní síť čtvrté generace.....	46
3.7.1	Technické specifikace LTE	47
3.7.2	Architektura sítě.....	48
3.7.3	LTE-A	49

3.8	Sítě páté generace	50
3.8.1	Technické specifikace 5G	51
3.8.2	Architektura sítě.....	53
3.8.3	Sítě páté generace v ČR	54
4	Vlastní práce	56
4.1	Metodika sběru dat.....	56
4.2	Hardwarové vybavení	60
4.3	Softwarové vybavení	61
4.4	Využité služby operátorů	65
4.5	Metodika zpracování dat.....	65
5	Výsledky a diskuze	67
6	Závěr	88
7	Seznam použitých zdrojů.....	90

Seznam obrázků

Obrázek 1: Šestiúhelníkové uspořádání vysílacích stanic v celulární síti	17
Obrázek 2: Topologie CESNET k lednu 1995	22
Obrázek 3: Topologie CESNET ke květnu 2023	25
Obrázek 4: Architektura sítě GSM.....	31
Obrázek 5: GSM kanál pro přenos hlasu	35
Obrázek 6: Architektura sítě UMTS	44
Obrázek 7: Architektura sítě LTE	49
Obrázek 8: Typy sdružování nosných.....	50
Obrázek 9: Architektura sítě 5G-NSA	53
Obrázek 10: Architektura sítě 5G-SA	54
Obrázek 11: Mapa lokalit měření a jejich umístění v rámci zvolené oblasti.....	57
Obrázek 12: Poloha místa pro monitoring vytížení sítě vzhledem vysílačům	60
Obrázek 13: Uživatelské rozhraní aplikace Speedtest by Ookla	62
Obrázek 14: Uživatelské rozhraní aplikace ČTÚ-NetTest.....	63
Obrázek 15: Uživatelské rozhraní aplikace NetMonster	64
Obrázek 16: Detail základnové stanice v interaktivní mapě.....	64
Obrázek 17: Kompletní záznam pro jednu z vybraných lokalit	66
Obrázek 18: Výřez z tabulky s informacemi o udávaném a skutečném pokrytí	67

Seznam tabulek

Tabulka 1: Kódovací schémata GPRS	38
Tabulka 2: Přesný seznam lokalit měření	58
Tabulka 3: Souhrnné údaje o udávaném pokrytí.....	68
Tabulka 4: Souhrnné údaje o zjištěném pokrytí.....	69
Tabulka 5: Souhrnné údaje o vzdálenostech od BTS.....	74
Tabulka 6: Průměrné hodnoty sledovaných parametrů připojení k internetu	76
Tabulka 7: Průměrné hodnoty sledovaných parametrů připojení pro 37/39 lokalit.....	76
Tabulka 8: Mediány sledovaných parametrů připojení k internetu	77
Tabulka 9: Mediány sledovaných parametrů připojení pro 37/39 lokalit	78
Tabulka 10: Průměrné hodnoty parametrů připojení dle technologií a operátorů	78
Tabulka 11: Průměrné hodnoty parametrů signálu v jednotlivých lokalitách	87

Seznam grafů

Graf 1: Počet spojení dle typu sítě a jejich podílu na celku.....	70
Graf 2: Využití frekvenčních pásem napříč operátory	72
Graf 3: Mediány vzdáleností od vysílače podle technologií a operátorů.....	75
Graf 4: Vliv denní doby na průměrnou rychlost stahování.....	80
Graf 5: Průměrné rychlosti stahování v jednotlivých lokalitách	82
Graf 6: Průměrné rychlosti nahrávání v jednotlivých lokalitách	84

1 Úvod

V druhé polovině 20. století se začaly po světě ve velkém rozšiřovat mobilní telefony, které s sebou přinesly zcela nové možnosti komunikace. Provádění hlasových hovorů v podstatě odkudkoliv a kdykoliv se rychle stalo velice populární záležitostí a zákazníci jej brzy začali preferovat před klasickou pevnou telefonní linkou. Během krátké doby tak bylo nutné vytvořit poměrně sofistikovanou rozsáhlou síť základových stanic, které zajišťovaly pokrytí mobilním signálem pro danou oblast.

Postupem času procházela přenosová infrastruktura většími či menšími změnami, na základě kterých je příslušné technologie možné rozřadit do několika tzv. generací. Zatímco zástupci první z nich tvořily skupinu vzájemně nekompatibilní standardů, následná evoluce v podobě GSM přinesla vyjma digitalizace a SMS zpráv také roaming, který umožnil každému zařízení připojení k mobilní síti v podstatě kdekoliv na světě.

S příchodem 21. století a větším množstvím pokročilých funkcí, které mobilní telefony nabízely, začala stoupat poptávka po datových přenosech, jejichž zdokonalování se stalo předmětem zájmu techniků po dalších několika let a tento trend přetrvává až dodnes. Kroky směrem k efektivnějšímu využití dostupných frekvenčních pásem a techniky spojování nosných či navýšení počtu antén přinesly posun k přenosovým rychlostem v řádu stovek Mbps až jednotek Gbps. Současná pátá generace nabízí díky vysoké kapacitě sítě a nízké latenci zcela nové příležitosti z hlediska IoT. Z popsaných benefitů čerpají například chytrá města či některá odvětví průmyslu, kde 5G pomáhá s robotizací a automatizací.

Nejmodernější technologie představují také zajímavou možnost pro připojení domácností k internetu v místech, kde selhávají ostatní zejména tradiční kabelové alternativy. Dostupnost datových služeb v konkrétní oblasti se však odvíjí od celé řady parametrů, jejich analýza ve vybraných lokalitách je hlavním cílem této diplomové práce.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Hlavním cílem práce je zhodnotit aktuální stav mobilních datových sítí ve vybraných lokalitách České republiky. Mezi dílčí cíle patří zpracování teoretických východisek relevantních k řešené problematice s důrazem na historický a zejména současný technologický vývoj. Dále pak návrh vhodného postupu měření, výběr sledovaných veličin, a sběr dat za účelem následného vyhodnocení. Posledním dílčím cílem je analýza získaných výsledků a formulace závěrů.

2.2 Metodika

Metodika řešení teoretické části diplomové práce bude založena na studiu a analýze odborných informačních zdrojů. Na základě znalostí získaných v teoretické části práce budou v praktické části navrhnutá a provedena vlastní měření, která budou sloužit k praktickému porovnání aktuálního stavu mobilního datového připojení ve vybraných lokalitách České republiky dle předem určených parametrů. Data získaná během experimentálního měření budou následně pomocí vhodných nástrojů a metod vyhodnocena. Na základě syntézy poznatků teoretické části a vyhodnocení výsledků praktické části budou formulovány závěry práce.

3 Přehled řešené problematiky

3.1 Historie přenosu informace a vzniku mobilních sítí

Potřeba komunikace byla pro člověka odjakživa velice důležitá. Z počátku k ní byl používán výhradně vlastní hlas, jenž má ale jednu zásadní nevýhodu – není schopný překlenout delší vzdálenosti. Postupem času začali lidé zaznamenávat svá sdělení do hliněných destiček a později na výrazně lehčí a méně křehký papyrus. Jakýkoliv přenos takto uchovaných zpráv byl však stále striktně svázán s potřebou nosič k adresátovi fyzicky přemístit. To může být problém zejména v případě delších vzdáleností, kdy je tento způsob značně neinteraktivní z důvodu svého dávkového charakteru. Vždy se totiž přenáší najednou celá dávka dat, jejíž kteroukoliv část je možné zpracovat teprve po úspěšném doručení. Případný výsledek tohoto zpracování je pak přenesen zpět ve formě další dávky, což opět určitý čas trvá. Doba odezvy je pak dána součtem doby přenosu obou dávek a v případě delších vzdáleností a nutnosti fyzické manipulace se zprávou je jasně patrné, že není z dnešního pohledu uspokojivá (Peterka, 1994).

Ačkoliv lidem trvalo, než si uvědomili, že svá sdělení mohou přenášet i jiným způsobem než jen fyzickým přenosem nosičů, na kterých byla zaznamenána, tak se zřejmě již od starověku v některých specifických situacích využívalo optické signalizace. Jednalo se zejména o kouřové signály nebo strážní ohně, jež měly zpravidla za úkol včas varovat před příchodem nepřítele. Nejvyšší vývojové stádium těchto prvotních sdělovacích systémů pak představoval optický telegraf bratří Chappéů. Celý systém se skládal z několika věží postavených na dobře viditelných místech ve vzdálenosti 12 až 15 km. Každá z věží disponovala soustavou pák a ramen, které se mohly různým způsobem natáčet a svou polohou podle předem dohodnutého klíče tak signalizovat jednotlivé části zpráv. Omezený dosah, daný přímou viditelností, se pak řešil budováním celého řetězce stanic, které si zprávy postupně předávaly. Tímto způsobem byla kolem roku 1793 vzájemně propojena města Paříž a Lille, která od sebe dělí více než 200 km. Přenos zpráv mezi těmito dvěma lokalitami trval v řádu jednotek minut. Vynález byl hojně používán během Napoleonských válek a postupně se rozšířil i mimo Francii (Peterka, 1994).

Optický telegraf byl v průběhu let nahrazen telegrafem elektrickým, za jehož autora je všeobecně považován americký vynálezce Samuel Finley Breese Morse. Nebyl sám, kdo se snažil o přenos informací podobnou cestou, avšak byl skutečně prvním, komu se povedlo

dovést svůj telegraf do stádia praktického použití, kdy propojil města Washington a Baltimore a roku 1845 odvysílal první zprávu. Ve své době se jednalo o velice zásadní vynález, který si začal ihned podmaňovat celý svět. Již v roce 1847 byla vybudována první telegrafní trasa na našem území, a to z Vídně přes Brno až do Prahy. V následujících letech pak došlo ke zprovoznění telegrafních linek přes kanál La Manche a Atlantský oceán. Samotný přenos probíhal po kabelu, zavěšeném na sloupech, na jehož koncích byl signál interpretovaný v optické nebo zvukové podobě převáděn na jednotlivé znaky tzv. Morseovy abecedy, která byla vymyšlena již ve třicátých letech 19. století (Peterka, 1994).

I když se to může z dnešního pohledu zdát jako paradox, hlavní nevýhodou elektrického telegrafu byl jeho digitální charakter, kdy se každá zpráva pro potřeby přenosu musela kódovat, což představovalo problém pro všechny, kteří toto kódování neovládali. Proto se nelze příliš divit, že byl Morseův telegraf záhy nahrazen analogovým telefonem, který dokázal přenášet přímo lidský hlas, jenž byl srozumitelný každému (Peterka, 1994). Za jeho vynálezce je všeobecně považován Alexander Graham Bell, který si jej nechal roku 1876 patentovat, ačkoliv podle nejnovějších údajů je první telefon dílem italského vynálezce Antonia Meucciho. Ten údajně roku 1874 neměl peníze na prodloužení svého patentu, čímž by znemožnil jeho vydání panu Bellovi o dva roky později (Homolová, 2020).

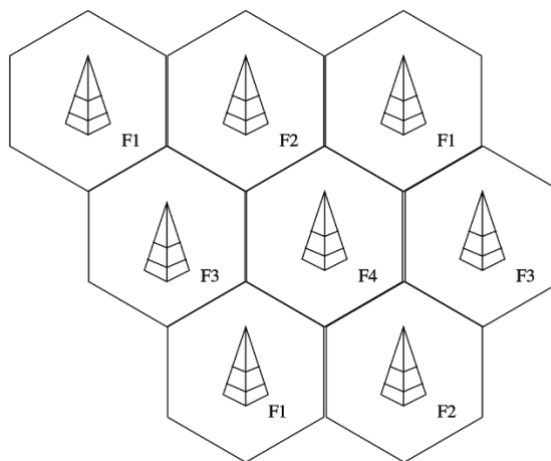
Společným znakem analogového telefonu a digitálního telegrafu byl způsob propojení mezi komunikujícími uzly. Ty byly v obou případech spojeny pomocí kabelů. Zlom nastal v druhé polovině 19. století, kdy americký fyzik James Clerk Maxwell popsal úzkou spojitost mezi elektřinou a magnetismem a vytvořil tak nový obor elektromagnetismus. Z jeho rovnic je navíc patrné, že světlo má stejnou podstatu jako elektřina – oboje je elektromagnetickým vlněním. O potvrzení této teorie se později roku 1888 postaral Heinrich Hertz, když se mu podařilo přenést elektromagnetické vlny bez použití vodičů (Lu et al., 2016, s. 3).

První, kdo dokázal využít elektromagnetické vlny pro bezdrátový přenos informace byl italský fyzik Guglielmo Marconi, který si roku 1896 nechává patentovat bezdrátový telegraf a o necelé čtyři roky později podniká první úspěšné pokusy s přenosem rádiových (též elektromagnetických) vln přes Atlantský oceán. Přenést obdobným způsobem také lidský hlas se podařilo Reginaldu Fessedenovi na Štědrý den roku 1906 (Rambousek, 2003). Ve stejném roce byla objevena i trioda neboli elektronka se třemi elektrodami, která funguje jako zesilovač a zasloužila se tak významně na rychlém rozšíření bezdrátových přenosů,

jelikož s její pomocí bylo možné konstruovat výkonné rádiové vysílače a také dostatečně citlivé přijímače. O další větší rozvoj se postaraly obě světové války a potřeba vzájemné komunikace na bojišti (Peterka, 1994).

Důležitým milníkem se z dnešního pohledu stal rok 1947, kdy byl v Bellových laboratořích v USA vynalezen tranzistor, což je polovodičová součástka, která je základem všech dnešních integrovaných obvodů. Ve stejnou dobu publikoval ve stejnojmenném vědeckém zařízení inženýr D. H. Ring první návrh celulární telefonní sítě, s jejímž využití počítal v té době výhradně v automobilech (Madrigal, 2011). Princip spočíval v rozdělení oblasti na několik vzájemně se překrývajících buněk, mezi kterými bude následně uživatel přepojován. Jako nejvhodnější se jevilo šestiúhelníkové uspořádání patrné z obrázku č. 1, v němž je každá ze stanic obklopena šesti stejně vzdálenými stanicemi, což je předpoklad pro minimální rušení a počet frekvencí, které je navíc možné v jiných nesousedních buňkách použít znovu. Patent na „Systém pro mobilní komunikaci“ byl vydán na základě žádosti Bellových laboratoří roku 1972. Testovací provoz byl zahájen až o několik let později a jeho následkem začaly postupně vznikat mobilní sítě první generace (Rambousek, 2003).

Obrázek 1: Šestiúhelníkové uspořádání vysílacích stanic v celulární síti



Zdroj: (O'Regan, 2018, s. 231)

3.2 Historie Internetu

Historie Internetu sahá až do období Studené války, kdy americká firma RAND Corporation dostala od vlády USA nelehký úkol, kterým bylo vymyslet, jak by jednotlivé administrativní orgány mohly úspěšně komunikovat i po případné jaderné válce. Cílem bylo vyvinout systém, který by dokázal spojit jednotlivá města, státy či vojenské základny a zůstal

by funkční i pokud dojde k destrukci některých z jeho částí. V roce 1964 tak byla zveřejněna studie možného řešení, které mimo jiné spočívalo v absenci centrální složky sítě, jež by se pravděpodobně stala prvním cílem nepřátelského útoku. Všechny uzly v síti tak měly mít v zásadě rovnocenné postavení a měly počítat s tím, že jednotlivé přenosy mezi nimi nejsou spolehlivé, což znamená, že se v případě chyby jednoduše pokračuje v přenosu dál bez sjednání nápravy. Spolehlivost navíc nikdy není absolutní a snahou o její dosažení se naopak narušuje plynulost doručování dat, čímž vznikají prodlevy, které mohou být leckdy horší než občasná chyba (Peterka, 1995).

Nutnost použití nespolehlivého přenosu stála u zrodu ve své době revoluční myšlenky, která spočívala v rozdělení přenášených dat na menší části nazývané pakety, s nimiž bude manipulováno jako se samostatnými celky. Každý datový paket měl být opatřen plnou adresou svého příjemce a cesta jeho přenosu měla být volena samostatně, nezávisle na ostatních, což zaručovalo doručení většiny dat i pokud dojde k náhlému zničení jedné z tras. Na svět tak přišla technika dnes známá jako přepojování paketů ve variantě nazývané datagramová služba, což je označení pro bloky dat přenášené nespojovaným způsobem (Peterka, 1995).

Přepojování paketů je společně s přepojováním okruhů jedním ze základních paradigmat přenosu dat. Princip je založen na bázi sdílené přenosové kapacity, která se nevyhrazuje pro konkrétní spojení a využívá se vždy celá pro všechny různé odesílatele a příjemce. Úkolem každého odesílatele je pouze předání dat rozdělených na jednotlivé bloky, které budou opatřeny identifikací adresáta. Nespojovaný způsob přenosu dat poté znamená, že dvě mezi sebou komunikující strany předem nenavazují spojení, nepřechází mezi různými stavy, není hledána žádná jediná trasa přenosu a nemusí být nutně zachováno pořadí doručovaných paketů. Veškeré výše zmíněné vlastnosti odlišují způsob komunikace v počítačových sítích od těch telekomunikačních, kde se naopak využívá spolehlivého spojovaného přenosu na principu přepojování okruhů (Peterka, 2014).

Ačkoliv se původní myšlenka o silně decentralizované a maximálně odolné síti zrodila v USA, k prvním praktickým pokusům došlo ve Velké Británii roku 1968. Testy na území Spojených států na sebe však nenechaly dlouho čekat. Na starost je dostala agentura ARPA (Advanced Research Project Agency) spadající pod tamní ministerstvo obrany. Podle ní byla následně experimentální síť pojmenována ARPANET. O umístění prvních uzlů sítě bylo rozhodnuto na základě požadavku na vzdálený přístup k tehdejším superpočítačům,

kteře se v tē době nacházely výhradně na univerzitách. Z tohoto důvodu byly pro ranou fázi implementace vybrány čtyři univerzity a 29. 10. 1969 byla odeslána historicky první zpráva z UCLA (University of California Los Angeles) do Stanfordu (Peterka, 1995).

Počet zapojených institucí se v následujících dvou letech rozrostl na několik desítek a v roce 1973 se k síti ARPANET připojují první dva zahraniční uzly z Velké Británie a Norska. Agentura ARPA, jenž byla toho času přejmenována na DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) se zároveň pustila do nového projektu, jehož cílem bylo propojení sedmi počítačů na čtyřech ostrovech pomocí rádiových vln a vzájemné satelitní spojení dvou evropských stanic. Jako klíčový problém se však ukázal možný způsob dosažení konvergence mezi sítí ARPANET a zbytkem systému, kde mezi sebou měly jednotlivé uzly komunikovat bezdrátově. Odlišnosti ve velikostech paketů či přenosových rychlostech si vyžádaly potřebu tvorby nového univerzálního protokolu pro paketové sítě, jenž později vešel ve známost jako TCP/IP (Transmission Control Protocol a Internet Protocol) (O'Regan, 2018, s. 242–243). Jeho autory jsou pánové Vinton Cerf a Robert Kahn, kteří se tak významně podíleli na vzniku Internetu, jelikož umožnili vzájemnou komunikaci geograficky vzdálených a technologicky různorodých sítí. První testy nového protokolu, který je kvůli své komplexnosti rozdělen do celkem čtyř vrstev proběhly v roce 1977. V následujících letech získal protokol svou dnešní podobu a s účinností od 1. 1. 1983 na něj musely dle rozhodnutí ministerstva obrany USA povinně přejít veškeré počítače připojené do sítě ARPANET (CZ.NIC, 2017).

Ve stejné době došlo k oddělení samostatné sítě MILNET, která byla nadále schopná komunikace s ARPANETem, ale sloužila primárně pro vojenské účely. Tímto krokem získal ARPANET mnohem civilnější náplň práce. Svého času již vznikaly v USA i jinde po světě další počítačové sítě na bázi protokolu TCP/IP, pro které se ukázalo jako velice výhodné, když se mohly s ARPANETem spojit. Ten se tak stával páteřní sítí, na kterou se postupně nabalovaly další. Celému systému se začalo přízračně říkat Internet (Peterka, 1995).

V polovině 80. let si instituce NSF (National Science Foundation), jež má v USA na starosti podporu vědy a výzkumu vytvořila vlastní síť NSFNET spojující pět univerzitních výpočetních středisek opatřených superpočítači. V počátcích měla využívat přenosové kapacity ARPANETu, ale z důvodu neshody s jeho vedením bylo nutné vybudovat zcela novou síť, která byla později k ARPANETu připojena. NSFNET disponoval po spuštění přenosovou rychlostí 56 Kbps (O'Regan, 2018, s. 244).

Vzhledem ke štědrému přísunu finančních prostředků docházelo v následujících letech k masovému připojování dosud nezúčastněných institucí k NSFNETu a tím pádem k Internetu. Neřešitelný problém nepředstavovala ani brzy nedostačující přenosová kapacita, která byla na hlavních linkách navýšena na 1,544 Mbps již v roce 1988. Díky svým schopnostem tak NSFNET brzy zastínil ARPANET a postupně převzal roli páteřní sítě Internetu. Vše vyvrcholilo v březnu 1990, kdy byl původní ARPANET v tichosti odstaven. (Peterka, 1995)

Počátkem 90. let byl již částečně hotový technický základ dnešního Internetu. Stále se však jednalo o síť, která byla vyhrazena pouze pro akademickou komunitu a další instituce, ale nikoliv pro širší veřejnost. Komerčnímu využití se NSFNET bránil, a tak bylo agenturou NSF jakožto provozovatelem rozhodnuto, že dojde k jeho pozvolnému odstavení s tím, že hlavní přenosové funkce postupně převezmou zcela nové sítě fungující již na plně komerčním základě. Tím došlo k odštěpení některých částí současné sítě a vzniku řady nových. V důsledku tohoto kroku, který byl roku 1991 v USA posvěcen potřebnými legislativními změnami, tak začaly vznikat první poskytovatelé připojení alias provideři, kteří brzy založili sdružení komerčních poskytovatelů pod zkratkou CIX (Commercial Internet Exchange) (Peterka, 1998).

Druhým problémem tehdejšího Internetu byl charakter aplikací, které byly pro laika velmi obtížně použitelné. Ačkoliv se již pomalu začala prosazovat grafická uživatelská rozhraní, Internet zůstával stále pouze v textové podobě. Zlom nastal v roce 1990, kdy anglický informatik Tim Berners-Lee vynalezl ve švýcarském Centru jaderného výzkumu CERN systém pro práci s dokumenty v Internetu známý jako WWW (World Wide Web). Ten využívá princip hypertextu, kdy jsou jednotlivé webové stránky (dokumenty) navzájem propojeny pomocí odkazů. Každá ze stránek má svou jedinečnou URL adresu (Universal Resource Locator) a je formátována pomocí značkovacího jazyka HTML (Hypertext Markup Language). Pro komunikaci mezi servery, kde jsou jednotlivé dokumenty uloženy a programem určeným pro jejich zobrazení se pak využívá protokol HTTP (Hypertext Transfer Protocol). Aplikace, které procházení internetových stránek umožňují souhrnně označujeme jako webové prohlížeče (O'Regan, 2018, s. 244–246).

Ačkoliv první z nich naprogramoval sám tvůrce WWW Tim Berners-Lee, tak skutečně prvním prohlížečem, který nesl většinu znaků těch dnešních, byl Mosaic, vyvinutý na univerzitě v Illinois. Ten se vyznačoval zejména svým grafickým uživatelským rozhraním

a možností ovládní pomocí myši. Vynález WWW byl revolučním milníkem v historii výpočetní techniky, jelikož se zasloužil o masové rozšíření Internetu mimo akademickou sféru a stal se nedílnou součástí života současné populace (CZ.NIC, 2017).

3.3 Historie Internetu V ČR

Vývoj Internetu na našem území byl z velké části ovlivněn historickými událostmi, mezi které řadíme zejména dlouhotrvající okupaci vojsky Varšavské smlouvy a následnou sametovou revoluci v roce 1989. Do té doby totiž nebylo z politických důvodů možné, aby se Československo zapojilo do významných celosvětových sítí včetně Internetu.

Přesto nelze konstatovat, že zde před zavedením Internetu nebyla žádná snaha o vytvoření prvních sítí. Již v roce 1976 byl na ČVUT v Praze umístěn počítač ICL 4-72, ke kterému se mohly pomocí dálkopisných terminálů připojovat zejména další vysoké školy (Spěšný, 2022, s. 44–45). Skutečný rozvoj však nastal až po změně režimu, ale namísto politických překážek se tentokrát objevily překážky technického charakteru v čele se špatným stavem komunikační infrastruktury, kvůli kterým si musely první sítě v počátcích vystačit jen s komutovanými linkami veřejné telefonní sítě. Začátkem roku 1990 se k nám dostává síť FIDO, na niž se napojují zejména stanice BBS (Bulletin Board System), které fungují v podstatě jako tematicky rozdělené komunitní nástěnky, do kterých je možné na dálku přispívat. Později téhož roku se pak do Československa dostává i síť EUnet, propojující Unixové počítače, kterou v řijnu následuje univerzitní síť EARN (European Academic and Research Network). Ta na rozdíl od svých předchůdců již požadovala trvalé spojení po pevných okruzích, což vedlo ke zřízení národního uzlu EARN pro tehdejší Československo, jenž se nacházel ve Výpočetním a informačním centru ČVUT v Praze a bylo spojenou linkou o rychlosti 9,6 kbps s rakouským národním uzlem v Linci (Peterka, 1995).

Ačkoliv se první pokusy s Internetem na našem území datují již do roku 1991, k oficiálnímu připojení Československa do této sítě došlo až 13. února 1992 na pražském ČVUT. Fyzické spojení bylo realizováno pevnou linkou, která byla uměle rozdělena tak, aby část přenášela provoz v rámci EARN a druhá část pak provoz Internetu. Celková maximální přenosová kapacita činila dohromady 19,2 kbps. Dalšímu rozvoji však i nadále bránila nevyhovující infrastruktura, která stála za myšlenkou vybudování celorepublikové páteřní sítě, jež by rozvedla Internet alespoň do všech tuzemských akademických institucí, zatímco

Přesto že byl CESNET původně vybudován jako akademická páteřní síť, s cílem poskytovat připojení k Internetu vysokým školám, tak již koncem roku 1993 vycítil jistou poptávku po svých službách ze strany komerčních subjektů. Situace však nebyla tak jednoduchá, jelikož výhradní licenci na provozování veřejné datové sítě vlastnila v tu dobu společnost EuroTel, která ji získala v roce 1990 na dobu následujících pěti let. A protože Internet není ničím jiným než veřejnou datovou sítí, měli v podstatě všichni komerční zájemci o připojení smůlu (Zandl, 2003).

S řešením přišla v dubnu 1994 komerční společnost s názvem Conet, která byla výhradním provozovatelem národního uzlu EUnet v ČR. Ten disponoval spojením o rychlosti 64 kbps z Prahy do Amsterdamu, prostřednictvím kterého firma připojovala své zákazníky k evropské komunikační infrastruktuře EUnetu, přes kterou se mohli propojit i s Internetem. Trik, kterým Conet obcházel tehdejší legislativu spočíval v tom, že aby se kdokoliv mohl stát jejich zákazníkem, musel se nejprve stát členem sdružení, aby následně místo poplatku za služby hradil členský poplatek. Díky tomu se společnost úspěšně vyhýbala postihům ze strany státní správy (Zandl, 2003).

V reakci na nastalou situaci se také CESNET rozhodl nabídnout své služby mimo akademickou sféru. V dubnu roku 1994 dostal od ČTÚ povolení k poskytování svých služeb komerčním subjektům, které ovšem vylučovalo připojování jednotlivců. Z tohoto důvodu mohl CESNET z počátku nabízet připojení pouze organizacím a firmám, což ale kvůli extrémně vysokým cenám nepředstavovalo v praxi v podstatě žádné omezení. Pro státem vlastněný CESNET se v té době jednalo o výhodný krok, jelikož za úplatu nabídl ostatním nevyužitou kapacitu svých linek, za kterou na oplátku získal finanční prostředky nutné ke svému provozu a dalšímu rozvoji. Již koncem roku 1994 pocházela zhruba třetina financí z poskytování internetových služeb jiným organizacím než vysokým školám. (Zandl, 2003)

První zájemce z řad firem se oba poskytovatelé snažili oslovit na brněnském počítačovém veletrhu Invex na podzim 1994. Vzhledem k cenám, které lze považovat za velice vysoké i v dnešní době, je však pochopitelné, že se z počátku jednalo o službu pro několik málo společností, jež připojení k Internetu braly jako konkurenční výhodu. Konkrétní ceny za připojení pevnou linkou se v závislosti na rychlosti (9,6 – 64 kbps) pohybovaly v rádech nižších desítek tisíc Kč za měsíc. V případě komutovaného (vytáčeného) připojení se pak jednalo o jednotky tisíc, ke kterým bylo ale často nutné připočítat další poplatek účtovaný za každou minutu připojení (Zandl, 2003).

S pádem monopolu společnosti EuroTel na provozování veřejné datové sítě v létě 1995 přicházejí na trh další poskytovatelé připojení, což s sebou v následujících měsících a letech nese společně s rostoucím zájmem o Internet také znatelný pokles cen. V roce 1996 vzniká první český ryze internetový deník Neviditelný pes a Ivo Lukačovič spouští dodnes využívaný portál a vyhledávač Seznam.cz (Václavík, 2017).

S narůstajícím zájmem o připojení k Internetu byly samozřejmě spojeny také vyšší nároky na přenosovou síť. Již v roce 1994 se Česká republika zapojila do projektu TEN-34 (Trans-European Network Interconnect at 34 Mbps), jehož cílem bylo vybudování páteřní sítě propojující univerzity a výzkumná střediska linkami o rychlosti 34 Mbps. TEN-34 měl v podstatě kopírovat již fungující strukturu CESNET za využití novějších technologií při zachování obdobné hvězdicové topologie. První okruh o požadované rychlosti 34 Mbps byl mezi Prahou a Brnem zprovozněn ještě téhož roku. Počátkem toho dalšího se projekt dostal do fáze, kdy bylo možné začít s přepojováním akademických pracovišť ze sítě CESNET na TEN-34. Nejprve však bylo nutné vyřešit problém komerčních zákazníků, kteří do té doby využívali přenosových kapacit sítě CESNET, což bylo ale v rozporu s provozním řádem TEN-34. Proto bylo rozhodnuto o separaci nově vzniklé univerzitní sítě od komerční sféry, která i nadále využívala původní infrastrukturu CESNET (Zandl, 2003).

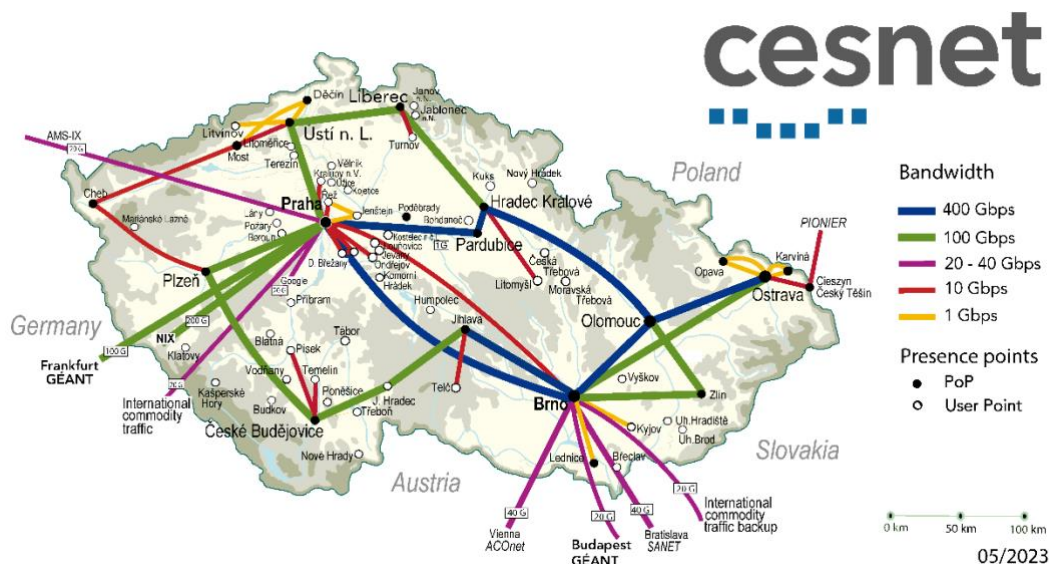
Spojení TEN-34 se zahraničím zajišťovaly linky z Prahy do Mnichova a Stockholmu, každá o kapacitě 2 Mbps, ke kterým se později přidalo spojení do Frankfurtu o rychlosti 34 Mbps. V průběhu roku 1998 síť na našem území obsluhuje již celkem 14 měst. Navíc dochází k dalším investicím, které pomohou s navýšením kapacity páteřního vnitrostátního spojení mezi Prahou a Brnem na 155 Mbps a zřízením dvou dalších zahraničních linek do Frankfurtu a New Yorku o rychlostech 16 Mbps. Projekt je oficiálně ukončen roku 1998 společně se spuštěním jeho nástupce pod názvem QUANTUM, který si kladl za cíl vybudování nové celoevropské sítě TEN-155, jež využívala k propojení osmi klíčových zemí linky o přenosové rychlosti 155 Mbps. Další státy včetně ČR pak měly disponovat mírně pomalejším spojením (Zandl, 2003).

Počátkem roku 2000 byl zahájen testovací provoz linky o přenosové rychlosti 2,5 Gbps na trase mezi Prahou a Brnem, který se stal základním stavebním kamenem nové páteřní sítě CESNET2. Následně začalo také propojování dalších uzlů, přičemž došlo k jedné zásadní změně v topologii. Ostrava byla nově kromě Brna napojena také na Prahu, čímž je výrazně potlačena důležitost brněnského uzlu a síť se stává typicky hvězdicovitou

(Zandl, 2003). Zhruba o rok později vzniká projekt GÉANT jakožto následník celoevropské akademické sítě TEN-155 s jádrem o rychlosti 10 Gbps. K propojení CESNET2 a GÉANT došlo koncem roku 2001 (CESNET, 2023).

Další vylepšování vnitrostátní akademické sítě v ČR započalo s rokem 2004, kdy byla postupně nasazována nová optická technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), která umožňuje po jednom vlákne přenášet několik nezávislých signálů, čímž může zásadně navýšit kapacitu páteřních linek (Satrapa, 2016). Budování DWDM infrastruktury probíhalo průběžně do roku 2010, kdy si rostoucí objem datových přenosů vynutil potřebu další modernizace jádra sítě, jenž v následujících třech letech povýšilo na přenosovou rychlost 100 Gbps. Stejně kapacitní linkou bylo v roce 2015 osazeno také spojení do sítě GÉANT. Zatím poslední významný upgrade vnitrostátní páteřní akademické sítě byl dokončen v roce 2023 a umožňuje přenášet data rychlostí až 400 Gbps na jeden kanál s možností budoucího navýšení na 1000 Gbps. Takto vylepšená síť dostala nový název CESNET3 a její aktuální topologie je znázorněna na obrázku č. 3 (CESNET, 2023).

Obrázek 3: Topologie CESNET ke květnu 2023



Zdroj: (CESNET, 2023)

Liberalizace Internetu v roce 1995 s sebou přinesla vznik prvních komerčních poskytovatelů připojení. V té době většina generovaného provozu v síti směřovala do zahraničí, což se ale začalo postupně měnit koncem devadesátých let. Velkým dílem se o to zasloužily nově vznikající české zpravodajské weby v čele s portálem Seznam.cz nebo

rostoucím objemem e-mailové komunikace. Spojení lokálních poskytovatelů skrz jádro tehdejšího Internetu tak přestávalo dávat smysl, jelikož data určená pro přenos mezi dvěma body v ČR často putovala až za oceán a následně zpět. Takové řešení se ukázalo být nevýhodné nejen ekonomicky, ale také z pohledu vysoké latence a nízké efektivity provozu celé sítě. Začala tak být znatelná potřeba peeringu, tedy vzájemného propojení jednotlivých poskytovatelů za účelem přímé výměny datového provozu. Tímto způsobem byly již před rokem 1995 propojeny sítě CESNET a Conet, jejichž centra sídlila geograficky velmi blízko sebe. Koncept spojení každý s každým ale pro velké množství poskytovatelů nedával příliš smysl (Peterka, 2006).

Namísto toho převládl návrh postavený na existenci jednoho centrálního peeringového bodu. S tímto záměrem bylo roku 1996 založeno sdružení poskytovatelů internetového připojení NIX.CZ. Celý systém byl od začátku koncipován jako neutrální, což znamená, že jej sdružení provozuje v podstatě samo pro sebe a jeho primárním posláním není tvorba zisku (Peterka, 2006). Samotný propojovací uzel je umístěn v Praze a provideři se k němu mohou připojit skrz několik přístupových lokalit, které jsou vzájemně spojeny. Všechny se stejně jako centrální peeringový bod nacházejí v hlavním městě. V současné době NIX.CZ poskytuje své služby také v Bratislavě či Vídni a spolupracuje s německým uzlem DE-CIX. Jeho síťový provoz dosahuje průměrné denní špičky okolo 2 Tbps (NIX.CZ). Spojení s převážně akademickou sítí CESNET3 zajišťují dvě linky, každá o přenosové kapacitě 100 Gbps (CESNET, 2023). Od roku 2013 pak v ČR funguje konkurenční peeringový uzel Peering.cz, který je založen na komerční bázi (Vyleťal, 2013). Oba zmíněné uzly společně se sítí CESNET tvoří páteř naší přenosové infrastruktury.

3.4 Mobilní sítě první generace

Mobilní sítě první generace začaly vznikat v 80. letech minulého století a stejně jako všechny následující jsou postaveny na principu rozdělení oblasti do tzv. buněk, které dohromady tvoří celulární síť. Podkladem pro budoucí realizaci se stal výzkum, jenž byl prováděn v Bellových laboratořích v USA a na jehož základě došlo roku 1979 k zahájení testovacího provozu sítě AMPS (Advanced Mobile Phone System). Její komerční provoz poté započal o čtyři roky později současně se startem prodeje prvního veřejně dostupného mobilního telefonu Motorola DynaTAC 8000X. Ačkoliv se jeho technické parametry v čele s hmotností 800 g a baterií, která na jedno nabití zvládla maximálně 30 minut hovoru

diametrálně liší od dnešních chytrých telefonů, tak šlo na tehdejší dobu bezpochyby o převratné řešení především z hlediska možnosti přenášení (O'Regan, 2018, s. 231–234).

Vývoj a budování obdobných sítí se samozřejmě neomezovalo pouze na území USA. V Evropě se postupem času stala velmi populární síť NMT (Nordic Mobile Telephony), která má své kořeny ve Skandinávii. Její první nasazení ovšem proběhlo v Saúdské Arábii v roce 1981. Ještě téhož roku se však přidalo také Švédsko a další severské země následovaly velmi brzy. Mezi další zástupce sítí první generace řadíme také systém TACS (Total Access Communication System), který si odbyl svou premiéru ve Velké Británii v roce 1985 (O'Regan, 2018, s. 231–234).

Zásadní odlišností všech zmíněných sítí od budoucích generací je fakt, že fungovaly na analogovém principu a soustřeďovaly se pouze na přenos hlasu, bez dodatečných datových služeb. Zejména první z vlastností s sebou nese několik nevýhod. Mezi ty nejzásadnější se řadí nízká kvalita přenosu a s ní spojená náchylnost na rušení nebo také absence ochrany proti odposlechu (O'Regan, 2018, s. 233). Naopak předností je vyšší průchodnost signálu krajinou a z toho plynoucí nutnost budování menšího počtu buněk pro obsluhu stejně rozlehlé oblasti ve srovnání s následníky, což je důsledkem fungování těchto analogových systémů na nižších frekvencích. Opačnou stranou mince je však nižší kapacita sítě vycházející ze stejného fyzikálního předpokladu (Adsl.cz, 2015). Z uvedených charakteristik dále vyplývá, že celá technologie byla postavena výhradně na principu přepojování okruhů.

V obecné rovině je pro realizaci telefonního hovoru potřeba vyhradit určitý frekvenční kanál. Za tímto účelem existují licencovaná kmitočtová pásma s ochranou proti rušení, jejichž přidělování mobilním operátorům u nás zajišťuje Český telekomunikační úřad (ČTÚ). Jelikož v rámci telefonní sítě probíhá v jeden časový okamžik několik hovorů zároveň, je nutné pásma dále rozdělit na větší množství kanálů (tzv. multiplexování), k čemuž se v tomto případě využívá přístupová technika FDMA (Frequency Division Multiple Access). Ta provádí dělení na základě frekvence. Výsledkem je několik samostatně využitelných kanálů v jednom kmitočtovém pásmu (Pužmanová, 2004, s. 27).

Jelikož komunikace v mobilní síti probíhá vždy mezi dvěma stranami, je nutné se zabývat tím, jak je obousměrný (tzv. duplexní) přenos řešen. V případě zástupců první generace se jedná o princip FDD (Frequency Division Duplex), kdy je pro každý směr použit

samostatný (jednosměrný) frekvenční kanál. Dvojice kanálů se pak souhrnně označuje jako tzv. párové pásmo (Peterka, 2014).

Na našem území došlo k prvnímu většímu průlomů v oblasti mobilních sítí až dva roky po sametové revoluci. Tehdejší vláda však musela pro zamýšlený projekt nejprve najít strategického partnera. Nově vytvořený společný podnik měl následně získat licenci na provozování veřejné datové sítě a sítě mobilních telefonů. Zájemců bylo hned několik, avšak ke zdárnému konci nakonec dospělo až jednání s americkým konsorciem Atlantic West, které tak získalo 49% podíl v nově vzniklé společnosti Eurotel. Zbylá část připadla státem vlastněnému podniku SPT Telecom. Za licenci na provozování NMT sítě v pásmu 450 MHz po dobu dvaceti let zaplatil tehdy Eurotel zhruba 800 milionů Kč (Zandl, 2004).

Její provoz oficiálně započal 12. září 1991, kdy byl v přímém televizním přenosu uskutečněn první hovor v mobilní síti na trase mezi Prahou a Bratislavou za použití telefonu Dancall 7025, což byl zároveň první u nás prodávaný mobilní telefon s pořizovací cenou okolo 100 000 Kč. Odlišností oproti dnešním zařízením byla kromě jiného absence SIM karty, jelikož telefonní číslo bylo pevně svázané s konkrétním přístrojem (Macek, 2012). NMT síť pracovala na frekvencích 451,3–455,74 MHz pro uplink (směr od telefonu k základnové stanici) a 461,3–465,74 MHz pro downlink (směr od základnové stanice k telefonu). Každý ze směrů byl pomocí přístupové techniky FDMA rozdělen na 221 kanálů o šířce 20 kHz s ochranným pásmem 10 kHz na obou koncích (Peterka, 2014).

Maximem v počtu uživatelů bylo pro celulární síť první generace u nás číslo 100 000. Ačkoliv v tehdejší Československu došlo z pochopitelných politických důvodů k nasazení technologie NMT až o něco později, na evropské scéně probíhala už v 80. letech minulého století jednání o vytvoření nového digitálního komunikačního systému (Zandl, 2004). Ten měl řešit zásadní problém tehdejších technologií v podobě vzájemné nekompatibility mobilních sítí napříč Evropou za pomoci tvorby jednotného standardu, což by do budoucna umožnilo podporu do té doby neexistujícího roamingu. Tím, že nebylo možné používat zakoupené telefony v jiné než domovské síti, byly vyšší také jejich ceny, jelikož se každý typ zařízení musel vyrábět v několika variantách podle toho, pro jaký trh byl určen, což s sebou pochopitelně neslo nemalé finanční náklady (Macek, 2012).

Za zmíněným účelem vznikla již v roce 1982 standardizační skupina GSM (Groupe Spécial Mobile), jež dostala tvorbu nového standardu na starost. Vyřešit se kromě absence

roamingu a vyšší kvality hovorů měla například také nepříjemnost v podobě možnosti snadného odposlouchávání hovorů. Tento krok se stal základním pilířem pro vývoj mobilních sítí druhé generace. K definitivnímu ukončení provozu té první však v České republice došlo až 30. června 2006 tedy zhruba 15 let po jejím spuštění (Peterka, 2014).

3.5 Mobilní síť druhé generace

Již od počátku se s mobilními sítěmi druhé generace pojila snaha o umožnění roamingu a zavedení jednotného standardu napříč státy. Nelze však konstatovat, že výsledkem vývoje byla pouze jedna technicky shodná globální síť, kterou by bylo možné využívat kdekoliv na světě. Jednoznačně nejrozšířenějším standardem druhé generace se stal evropský GSM (Pužmanová, 2004, s. 248). V roce 2004 mu připadal tržní podíl 75 %, jenž se následně v průběhu let ještě zvyšoval až na současných zhruba 90 % (GSMA, 2024).

Jeho kořeny sahají do již zmiňovaného roku 1982, kdy byla Konferencí evropských správ pošt a telekomunikací vytvořena stejnojmenná pracovní skupina. O čtyři roky později byly definovány technické základy GSM. Odpovědnost za standardizaci nakonec přešla na Evropský ústav pro telekomunikační normy (ETSI) a původní francouzský význam zkratky se změnil z Groupe Spécial Mobile na Global System for Mobile Communications. V roce 1990 dochází ke zmrazení do té doby vytvořené specifikace, aby bylo možné na jejím základě začít budovat první síť (Sladký, 1999).

Milníkem se stalo datum 27. března 1991, kdy byl v síti finského operátora Radiolinja uskutečněn historicky první telefonický GSM hovor a v polovině téhož roku došlo k zahájení komerčního provozu. Počet mobilních sítí budovaných na základě standardu GSM v následujících letech rapidně stoupal. Již koncem roku 1993 jich bylo v provozu 32 a během dalších dvou let se jejich počet více než ztrojnásobil (Sladký, 1999). V České republice se zákazníci dočkali s mírným zpožděním 1. července 1996 (Marek, 2021).

Odlišností a vylepšení oproti první generaci je celá řada. Vyjma již zmiňovaného roamingu se mezi nejzásadnější bezpochyby řadí digitální způsob přenosu namísto analogového. Ačkoliv se GSM stále soustřeďuje zejména na hlasové přenosy, zvládá už také ty datové, i když o mobilním Internetu se minimálně v počátcích nedalo úplně mluvit. Rychlost přenosu dat totiž odpovídá pouze minimu nutnému pro komprimovaný hlas. Tento přístup k nakládání s dostupnou přenosovou kapacitou byl logicky zvolen za účelem možnosti uskutečnění co možná nejvíce telefonních hovorů v rámci vyhrazeného pásma

v jeden moment. Bez dodatečných úprav ale tím pádem není možné přenášet data vyšší rychlostí, než která je určena právě pro hlasové služby (Pužmanová, 2004, s. 247–248).

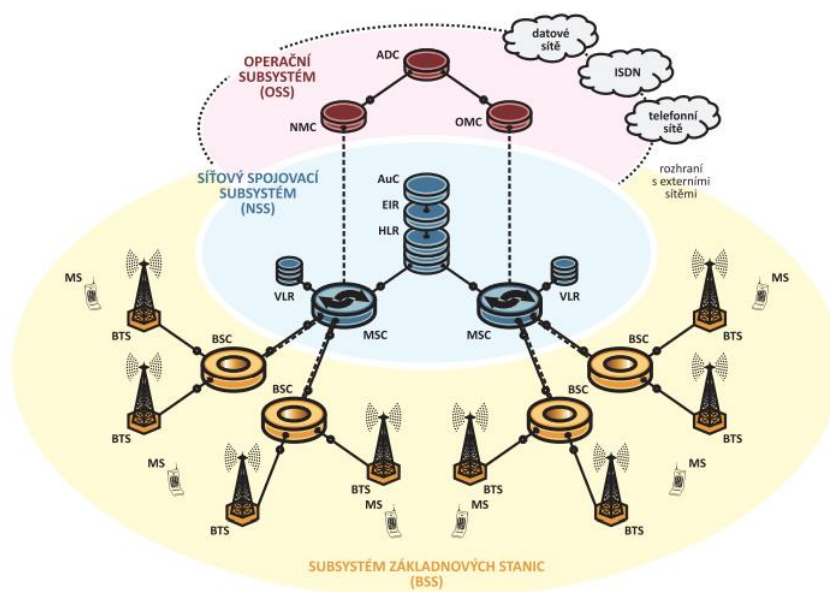
Sítě druhé generace i nadále fungovaly na principu přepojování okruhů a v tomto ohledu tak nepředstavovaly žádnou změnu. Již od svého počátku však nabízely uživatelům větší komfort. Znatelnou změnou byla vyšší kvalita hovoru a také vylepšené zabezpečení, jelikož komunikace mezi účastníkem a základnovou stanicí byla šifrovaná a nedocházelo tak k odposlechům. Možnost datových přenosů dala vzniknout krátkým textovým zprávám, zvaným SMS (Short Message Services), jež byly omezeny maximálním počtem 160 znaků. Premiéru si odbyly roku 1992 ve Velké Británii, načež se pro mnoho lidí staly klíčovým komunikačním kanálem a jejich obliba neustále rostla až do příchodu sociálních sítí. Své uplatnění ale jednoznačně nacházejí i v dnešní době (O'Regan, 2018, s. 234). Po bok telefonních hovorů a SMS zpráv se zařadil také další doplněk v podobě hlasové schránky (Bečvář et al., 2013, s. 28).

Novinku představovala nutnost vlastnit kromě mobilního telefonu také SIM kartu, jejíž účel spočíval v jednoznačné identifikaci účastníka v síti. Zároveň na ni bylo možné ukládat telefonní čísla s krátkým textovým popisem nebo některé SMS. Výměna zařízení tak nepředstavovala z hlediska přenosu adresáře žádný problém (O'Regan, 2018, s. 234).

3.5.1 Architektura GSM sítě

Architektura sítě GSM je tvořena třemi základními částmi, kterými jsou subsystém základnových stanic BSS (Base Station Subsystem), síťový spojovací subsystém NSS (Network Switching Subsystem) a operační a podpůrný subsystém OSS (Operation Support Subsystem), viz obrázek č. 4. Zvolené geografické území je předem vhodně rozděleno do dílčích elementárních oblastí neboli tzv. buněk. Obsluhu mobilních stanic MS (Mobile Station), jež se v danou chvíli nacházejí v prostoru vymezeném určitou buňkou pak zajišťuje základnová stanice (Bečvář et al., 2013, s. 29).

Obrázek 4: Architektura sítě GSM



Zdroj: (Bečvář et al., 2013, s. 30)

Jelikož rozsah frekvencí přidělený jednotlivým operátorům zdaleka nedostačuje k tomu, aby bylo možné každému probíhajícímu hovoru v síti přidělit samostatný komunikační kanál, dochází k opakovanému využívání stejných frekvencí v nesousedních buňkách. Ty jsou nejčastěji šestihranné a výsledné uspořádání tak svým vzorem připomíná plástve medu. K pokrytí libovolně velké oblasti pak stačí tři různé druhy buněk představující tři odlišné rozsahy frekvencí (Peterka, 2000).

V praxi lze k dosažení stejného výsledku použít také schéma se sedmi frekvencemi. Za další dílčí vylepšení lze považovat sektorizaci, při které jsou základnové stanice umístěny v místech styku tří sousedních buněk namísto středu každé z nich. Tímto krokem dochází k redukci počtu potřebných základnových stanic, které však nadále zvládají obsluhovat totožné území (Bečvář et al., 2013, s. 16–17).

Komunikace koncových zařízení (mobilních stanic) v celulárních systémech nikdy neprobíhá napřímo, nýbrž výhradně přes páteřní síť. Každá základnová stanice permanentně vysílá přímým řídicím kanálem souvislý bitový proud, podle něhož koncová zařízení rozpoznají, v jaké buňce se nachází a základnové stanice si tak mohou udržovat informace o všech zařízeních přítomných v rámci hranic buňky. Díky tomuto spojení je možné

účastníkům směřovat hovory přímo do oblasti, kde se momentálně s nejvyšší pravděpodobností nacházejí (Pužmanová, 2004, s. 248).

V případě, že se koncové zařízení přemístí do oblasti sousední buňky, dojde k automatickému předání komunikace příslušné základnové stanici. Tento proces je označován jako tzv. handover. Trvá velmi krátce a během hovoru je zcela nepostřehnutelný. Jelikož sousední buňky vždy používají jiné frekvence, je při pohybu mobilní stanice fakticky nutné přeladit na odlišný kmitočet (Bečvář et al., 2013, s. 21).

Základnové stanice neboli BTS (Base Transceiver Station) jsou nejviditelnějším a nejpočetnějším prvkem celého systému GSM. Zajišťují bezdrátové spojení s koncovými zařízeními a jejich komunikaci se zbytkem sítě. Několik základnových stanic je společně spravováno základnovou řídicí jednotkou BSC (Base Station Controller) a dohromady pak tvoří systém základnových stanic BSS (Sauter, 2021, s. 26).

Soustava všech základnových stanic je skrze své řídicí jednotky napojena na centrální ústřednu MSC (Mobile Switching Centre), což je v podstatě analogie klasické telefonní ústředny, jež slouží ke směrování jednotlivých hovorů k předem určeným příjemcům. Dále je však doplněna o další funkce plynoucí zejména z mobility přepojovaných účastnických stanic. V rámci sítě se takových ústředen nachází hned několik. Jedním z důvodů je ochrana proti částečnému výpadku, který by jinak mohl ochromit celý systém (Bečvář et al., 2013, s. 29).

Správné fungování centrálních ústředen je podpořeno několika databázemi a podpůrnými systémy, které slouží k evidenci uživatelů. Jedná se o domovský registr HLR (Home Location Register), návštěvnický registr VLR (Visitor Location Register), registr mobilních zařízení EIR (Equipment Identity Register) a autentizační centrum AuC (Authentication Centre) (Bečvář et al., 2013, s. 29).

První z nich uchovává informace o každém účastníkovi sítě GSM včetně rozsahu aktivovaných služeb či jeho aktuální poloze. K jednoznačné identifikaci uživatele slouží číslo IMSI (International Mobile Subscriber Identity) uložené na SIM kartě. Samotný proces ověření probíhá v autentizačním centru, které je součástí registru HLR. Vyjma toho AuC nadále zabezpečuje také šifrování komunikace mezi uživateli pomocí unikátního klíče (Mishra, 2018, s. 10).

Obě součásti jsou dále napojeny na EIR, kde jsou uloženy informace o jednotlivých mobilních stanicích ve formě čísla IMEI (International Mobile Equipment Identity), na jehož základě probíhá autorizace zařízení k použití v dané síti. Mimo jiné obsahuje seznam odcizených či neoprávněně používaných mobilních telefonů, kterým může být přístup zcela odepřen (Mishra, 2018, s. 10).

Posledním dílem síťového spojovacího subsystému NSS je návštěvnický registr VLR, jenž slouží k dočasnému uchování údajů o všech účastnících, kteří se v danou chvíli nachází v dosahu příslušné centrální ústředny MSC, a to včetně uživatelů v rámci roamingu. Jedná se v podstatě o lokální kopii informací z centrálního HLR, která je vytvořena za účelem snížení počtu dotazů přímo na domovskou databázi. Jakmile účastník změní svou polohu, dojde k vymazání dat z původního VLR, načež si je vyžádá stejnojmenný registr příslušící nové oblasti (Sauter, 2021, s. 16).

O zabezpečení provozu všech dosud zmíněných částí se stará operační subsystém OSS skládající se ze tří klíčových částí. Jedná se v první řadě o administrativní centrum ADC (Administrative Centre) zodpovídající za registraci účastníků do sítě, tarifkaci a vyúčtování jejich služeb či monitoring mobilních stanic. Dále pak o centrum managementu sítě NMC (Network Management Centre) zajišťující celkové řízení toku informací v systému GSM a o provozní a servisní centrum OMC (Operation and Maintenance Centre), jehož úkolem je provádění kontroly, údržby a konfigurace sítě (Bečvář et al., 2013, s. 29–30).

3.5.2 Technické specifikace GSM

Základní varianta systému GSM byla realizována v pásmu 900 MHz. Nárůst provozu a nedostatečná kapacita však brzy vedly k vývoji dalších dvou standardů známých jako GSM 1800 a GSM 1900. Hlavní odlišností všech zmíněných je vyjma použitého frekvenčního pásma také počet dostupných kanálů. Stejně jako v případě sítí první generace je i zde problematika obousměrného přenosu řešena principem FDD, kdy je pro každý směr použitý samostatný frekvenční kanál a jejich dvojice dohromady tvoří párové pásmo, jenž zaručuje plně duplexní provoz (Bečvář et al., 2013, s. 27).

Konkrétní šířka pásma pro původní verzi GSM 900 činí 25 MHz pro každý směr, což v praxi znamená frekvenční rozsah 890–915 MHz pro uplink a 935–960 MHz pro downlink. Duplexní odstup odpovídá hodnotě 45 MHz a značí pevně daný rozdíl mezi dvojicí frekvenčních kanálů v rámci jednoho párového pásma. Dostupné kmitočtové spektrum se za

pomocí přístupové techniky frekvenčního multiplexu FDMA dále dělí na 124 kanálů o šířce 200 kHz s ochranným pásmem 10 MHz na obou koncích (Peterka, 2000).

Na rozdíl od analogových sítí však technologie GSM dále rozdělí kanály na 8 tzv. timeslotů prostřednictvím techniky časového multiplexu TDMA (Time Division Multiplex Access). Každá komunikující dvojice tak dostane k dispozici konkrétní přenosový kanál po dobu 1/8 určitého časového kvanta, přičemž se v cyklech pravidelně střídají. Jeden kanál tak může současně osluhovat až 8 hlasových hovorů, což znamená, že celkově je k dispozici 992 timeslotů v každém směru (Peterka, 2000). K označení a jednoznačnému odlišení kanálů se používá číslo ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number), jenž nabývá hodnot 1–124. Z jejich celkového počtu je následně každému z operátorů v dané zemi na základě udělené licence alokována určitá část, která se rozvrhne mezi buňky daného poskytovatele služeb (Bečvář et al., 2013, s. 31).

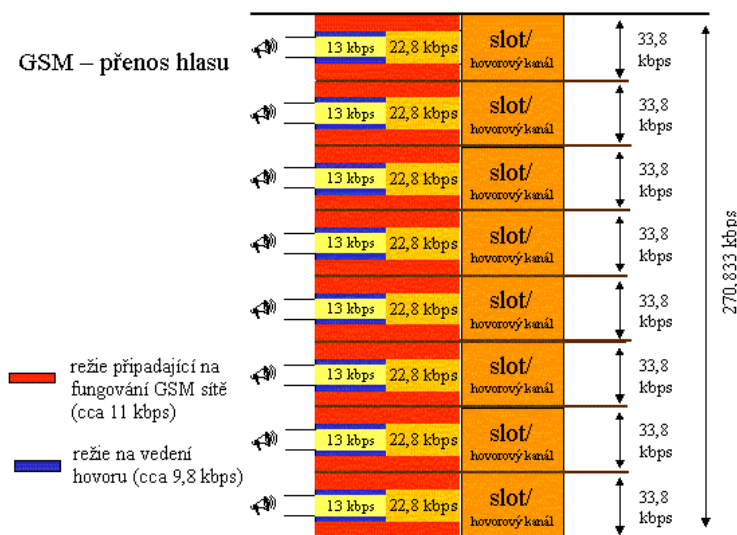
Veškeré zmíněné kroky jsou aplikovány také na novější obměny v podobě GSM 1800 a GSM 1900. V jejich případě ovšem šířka pásma činí 75 MHz či 60 MHz pro každý směr, což s sebou přináší poměrně značný nárůst v počtu dostupných komunikačních kanálů. Konkrétně se jedná o 374 u GSM 1800 a 298 u druhé varianty. Duplexní odstupy činí 95 MHz a 80 MHz (Bečvář et al., 2013, s. 27). Tyto systémy vznikly především za účelem obsluhy území s vysokou koncentrací mobilních stanic. Své uplatnění tak našly zejména ve velkých městech. Rozdíl mezi oběma zástupci spočívá mimo jiné v místech užití. Zatímco k rozšíření standardu pracujícího v pásmu 1900 MHz došlo výhradně na území Severní a Jižní Ameriky, tak verze GSM 1800 představovala alternativu pro zbytek světa (Frequencycheck, 2024).

K přenosu hlasu sítěmi druhé generace je nejprve nutná jeho digitalizace, o kterou se stará A/D převodník pracující na principu PCM modulace (Pulse Coded Modulation). Zvuk z mikrofónu je snímán celkem 8000x za sekundu a každý jednotlivý vzorek je vyjádřen pomocí 13 bitů. Přenosová rychlost vzniklého signálu tak činí 104 kbit/s. Následně dochází k aplikaci RPE/LTP (Regular Pulse Excitation/Long Term Prediction) komprese, čímž se datový tok zredukuje na přijatelnějších 13 kbit/s (Peterka, 2014).

Hlasový výstup, který byl podroben digitalizaci a kompresi je dále nutné opatřit zabezpečovacími údaji a režijními daty, jež jsou nutná pro správné fungování GSM sítí. Zabezpečující údaje představují zejména kódování za účelem znemožnění odposlechu nebo

eliminace zkreslujících vlivů a původní datový tok zvyšují o 9,8 kbit/s. Dalších 11 kbit/s představují režijní data. Výsledná hodnota 33,8 kbit/s je současně maximem pro jeden časový slot a promítá se tak i do přenosové kapacity celého kanálu, která se může vyšplhat až na necelých 271 kbit/s, jak je patrné z obrázku č. 5 (Peterka, 2014).

Obrázek 5: GSM kanál pro přenos hlasu



Zdroj: (Peterka, 2014)

3.5.3 Přenos dat v GSM

Ačkoliv se sítě druhé generace v čele s GSM zaměřují především na hlasové služby, lze je využít i pro přenos dat na principu přepojování okruhů. V základní podobě se datová služba označuje jako CSD (Circuit Switched Data) a stejně jako telefonní hovor zabírá jeden slot v každém směru komunikace. Z důvodu využití obdobně robustních technik a mechanismů pro zajištění spolehlivosti se však přenosová rychlost zastavila na 9,6 kbit/s (Peterka, 2000).

Zbývající přenosové schopnosti časového slotu jsou opět rozděleny mezi režii připadající na fungování sítě GSM (11 kbit/s) a již zmiňované zajištění spolehlivosti, ošetření chyb a výpadků (13,2 kbit/s). Po určité době se ovšem ukázalo, že datové služby nepotřebují tak robustní ochranné mechanismy jako komprimovaný hlas, čímž došlo ke zvýšení přenosové rychlosti uživatelských dat na 14,4 kbit/s právě na úkor zabezpečovacích procedur. Podmínkou pro dosažení těchto výsledků je ale dostupnost kvalitního signálu. Jeho zhoršení vede k rychlejšímu poklesu efektivní využitelnosti v porovnání s původní verzí (Peterka, 2000).

Další navýšení rychlosti přenášených dat přinesla služba HSCSD (High Speed Circuit Switched Data), která je postavena na totožných technických základech. Výrazného zrychlení bylo dosaženo současným použitím více časových slotů zároveň. Teoretickým maximem dosažitelné přenosové rychlosti je 115 kbit/s v jednom směru při obsazení celého kanálu. Záleží však na momentální vytíženosti sítě a schopnostech koncového zařízení. V praxi existuje celkem 18 tzv. tříd HSCSD, odstupňovaných podle počtu současně využitých slotů. V úvahu připadají také asymetrické varianty, které využívají odlišné počty slotů pro různé směry. Například ve třídě 6, jež připouští použití až 4 slotů současně, může být přenos realizován dvěma způsoby. V prvním případě dojde k vyhrazení dvou slotů pro downlink i uplink a přenosová rychlost se tak vyšplhá na 28,8 kbit/s. Alternativní konfigurace 3 + 1 pak ve směru k uživateli dosahuje rychlosti 43,2 kbit/s, zatímco pro opačnou cestu zbývá jen výchozích 14,4 kbit/s (Peterka, 2001).

Problémem technologií CSD a HSCSD určených pro přenos dat je z dnešního pohledu především princip přepojování okruhů, na kterém jsou postaveny. Trvale obsazují zdroje v podobě slotů nebo dokonce celých kanálů, jelikož se chovají v podstatě jako jeden či více hovorů. Vzhledem k tomu, že mobilní sítě nejsou dimenzovány na velké množství dlouhých hovorů, není vhodné uvedenými způsoby realizovat např. připojení k Internetu (Peterka, 2014).

Přesto se už toho času nejednalo o neřešitelný úkol díky sadě protokolů WAP (Wireless Application Protocol), která umožňovala na mobilních telefonech zobrazovat zjednodušené verze webových stránek. Připojení po dlouhou dobu nebylo výhodné ani pro uživatele, jelikož se zpoplatňovala každá minuta bez ohledu na reálný objem přenesených dat, což byl důsledek nutnosti vyhrazení síťových zdrojů pro daného zákazníka. Uvedené důvody se staly impulsem pro zavedení mobilních sítí na principu přepojování paketů (Bečvář et al., 2013, s. 44). Ty sice nadále spadají do druhé generace, avšak kvůli značným rozdílům se pro ně vžilo označení 2,5G.

3.5.4 GPRS a EDGE

Prvním zástupcem zmiňované skupiny technologií je GPRS (General Packet Radio Service), jež využívá dobře známé principy z oblasti počítačových sítí. Data musí být nejprve vhodně rozdělena do tzv. paketů, které se následně opatří identifikací příjemce. Za tímto účelem získávají koncové uzly při přihlášení do sítě určité konfigurační údaje neboli

tzv. PDP kontext (Packet Data Protocol). Jedná se především o IP adresu ve vazbě na IMSI a IMEI. Přenosové kapacity nejsou nikomu trvale vyhrazeny, ale jsou dostupné všem uživatelům zároveň, přičemž dochází k postupnému a co nejrychlejšímu odbavení paketů zadaných k odeslání. Výsledkem je efektivní využívání zdrojů pouze těmi uživateli, kteří v danou chvíli skutečně potřebují něco přenést, což s sebou přináší zásadní výhodu. Zákazníci jsou totiž zpoplatňováni na základě objemu přenesených dat namísto času. Taková mobilní síť pak může svým klientům nabízet trvalé připojení např. k Internetu. Jelikož v jednu chvíli bude data přenášet jen určitá část z nich, není z pohledu přenosové kapacity problém udržovat spojení s velkým počtem mobilních stanic (Peterka, 2014).

Poměrně značné technické odlišnosti oproti původní síti GSM si vyžádaly citelný zásah do již existující infrastruktury. V podstatě bylo nutné přes stávající síť přeložit novou fungující na principu přepojování paketů, čímž vznikla paralelní páteřní část. Došlo také k provázání řídicích prvků obou řešení a k přidání dvou nových typů uzlů. Těmi jsou SGSN (Serving GPRS Support Node) a GGSN (Gateway GPRS Support Node). SGSN lze považovat za analogii centrální ústředny MSC, jelikož zajišťuje směrování dat. Úkol GGSN bran poté spočívá v napojení na vnější datové síť, mezi než mimo jiné řadíme také Internet (Sauter, 2021, s. 88–90).

Výchozí předpoklady pro určení maximálních přenosových rychlostí GPRS jsou stejné jako v případě CSD a HSCSD, protože i zde je nutné počítat s režijními daty na zajištění fungování sítě, jež činí shodných 11 kbit/s. Na rozdíl od zmiňovaných je však možné zbylou přenosovou kapacitu o velikosti 22,8 kbit/s rozdělit mezi uživatelská data a data zajišťující spolehlivost přenosu hned několika způsoby, které se označují jako tzv. kódovací schémata (Pužmanová, 2004, s. 249–250).

Volba konkrétního schématu se provádí automaticky bez intervence klienta a závisí především na vzdálenosti od základnové stanice a kvalitě signálu. Celkem jsou k dispozici čtyři různé varianty CS-1 až CS-4, kdy větší číslo v názvu značí dostupnost vyšší užitečné přenosové rychlosti pro koncového zákazníka. Čím jsou podmínky pro přenos lepší, tím menší část z celkové přenosové kapacity je nutné vyhradit pro data zajišťující spolehlivost přenosu či ošetření chyb a výpadků (Pužmanová, 2004, s. 249–250). Detailní parametry jednotlivých kódovacích schémat shrnuje tabulka č. 1.

Tabulka 1: Kódovací schémata GPRS

Kódovací schéma	CS-1	CS-2	CS-3	CS-4
Max. kbit/s na 1 timeslot	9,05	13,4	15,6	21,4
Max. kbit/s při využití celého kanálu	72,4	107,2	124,8	171,2

Zdroj: (Pužmanová, 2004, s. 250)

Zatímco kódovací schéma omezuje maximální přenosovou rychlost na jeden časový slot, třída obdobně jako u HSCSD určuje počet současně využívaných slotů, který se může vyšplhat až na osm v jednom směru. Tímto způsobem lze stanovit teoretickou maximální přenosovou rychlost technologie GPRS 171,2 kbit/s (viz tabulka 1). V praxi je ale nutné zahrnout celou řadu vlivných faktorů, které výslednou rychlost znatelně sníží. Vyjma aktuální dostupné kapacity sítě záleží také na schopnostech koncového zařízení nebo na momentálních podmínkách pro šíření signálu. K ideálnímu souběhu všech okolností zpravidla nedochází, a proto se maximální přenosová rychlost pohybuje do 80 kbit/s. Omezení počtu slotů připadajících na jednoho uživatele přitom může aplikovat sám operátor. Už jen tímto krokem se dosažitelné rychlosti skokově snižují (Peterka, 2007).

Každá mobilní stanice zvládá fungování v jedné z GPRS tříd A, B nebo C (nejedná se o stejné třídy, které určují počet současně využívaných slotů). Ty popisují, jak se telefon chová, pokud má navázané GPRS spojení a zároveň někdo volá nebo posílá SMS. Třída A umožňuje v jednu chvíli používat hlasové i datové služby. Varianta B se omezuje současně pouze na jedinou, ale dokáže mezi nimi automaticky přepínat. Poslední třída C pak vůbec nedovoluje po dobu trvání GPRS připojení realizovat hovory nebo posílat SMS zprávy a naopak (Mishra, 2018, s. 67–68).

Poslední evoluční stupeň technologií pro přenos dat postavených na základech systému GSM představuje EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution). Cesta k vyšší efektivitě přenosu na bázi dokonalejšího kódování a sdružování několika slotů při zachování stávajících frekvenčních pásem a kanálů o šířce 200 kHz byla již vyčerpána. Dalšího navýšení přenosových rychlostí bez nutnosti zásadních úprav koncepce proto bylo dosaženo použitím odlišné techniky modulace (Bečvář et al., 2013, s. 46).

Namísto původní dvoustavové fázové modulace GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) bylo v případě EDGE přistoupeno k efektivnější osmistavové fázové modulaci 8-PSK (Phase Shift Keying). Ta umožňuje přenést tři informační bity pomocí jednoho symbolu / jedné změny fáze, což je trojnásobek v porovnání s předešlou verzí. Zároveň ale dochází ke zkrácení vzdálenosti mezi různými symboly, čímž se podstatně zvyšuje pravděpodobnost jejich nesprávné interpretace na jedné či druhé straně (Sauter, 2021, s. 76). Za tímto účelem musí být každá základnová stanice doplněna o nový transceiver s vyšším výpočetním výkonem. Obdobně musí být zajištěna podpora technologie na mobilní stanici (Bečvář et al., 2013, s. 46–47).

Teoretická maximální přenosová rychlost se díky novému typu modulace vyšplhala na hodnotu 473,6 kbit/s při současném využití všech 8 slotů. Technické a přírodní překážky zůstávají stejné jako u GPRS, a tak je v praxi v podstatě nereálné se obdobným rychlostem alespoň přiblížit. Opět jsou definována kódovací schémata, kterých je tentokrát celkem 9. První čtyři jsou shodná s GPRS a pracují s modulací GMSK. Zbytek schémat čerpá výhodou pokročilejší 8-PSK modulace. Výsledná přenosová rychlost je dále ovlivněna použitou třídou, která určuje možné konfigurace počtu timeslotů pro oba směry komunikace. V reálných podmínkách se rychlost stahování pohybuje do 200 kbit/s (Peterka, 2014).

3.5.5 Sítě druhé generace v ČR

Zatímco v případě sítí první generace, pro které se na našem území využívala výhradně technologie NMT, byla nabídka omezena pouze na jediného operátora, tak s nástupem 2G přišli také dva noví poskytovatelé hlasových a datových služeb. První z nich s názvem RadioMobil vznikl jako společný podnik telekomunikačních společností České Radiokomunikace a Deutsche Telekom. Provoz GSM sítě v pásmu 900 MHz pod označením Paegas zahájilo nově vzniklé konsorcium 30. září 1996. Tedy zhruba o tři měsíce později než Telecom, pro jehož zákazníky byla obdobná služba spuštěna již 1. července 1996. Třetího operátora získala Česká republika na přelomu tisíciletí, když se vítězem vypsání tendru stala společnost Český Mobil. Jejím majoritním akcionářem byla kromě tuzemské banky IPB zejména kanadská firma TIW (Telesystem International Wireless). Komerční provoz sítě pod názvem Oskar zahájily 1. března 2000 (Peterka, 2014).

Z počátku byl Oskar znevýhodněn, jelikož musel používat výhradně frekvenční pásmo 1800 MHz, se kterým se hůře pokrývají území mimo města. Jeho podporu přidali

zbylí dva operátoři shodně 1. července 2000. Nakonec však i Oskar stavěl také na druhém pásmu vyhrazeném pro GSM (Matura, Lodal, 2010). Počet klientů 2G sítí od spuštění každým rokem rostl. O prvenství od počátku soutěžil zejména Telecom a Paegas, zatímco Oskar se musel v porovnání s nimi spokojit zhruba s polovinou zákazníků. Konkrétně se koncem roku 2003 jednalo o zhruba 4 miliony aktivních SIM karet pro každého ze dvou prvně jmenovaných (Marek, 2021).

Postupem času došlo především z důvodu globálních strategií či akvizicí mateřských společností k přejmenování všech operátorů na našem území. Prvním, kdo k tomuto kroku přistoupil, byl Paegas, který je od roku 2002 známý jako T-Mobile. Následoval Oskar, který skončil k poslednímu lednu roku 2006, kdy se z důvodu změny vlastníka přejmenoval na Vodafone. V létě téhož roku pak stejný osud potkal také nejstaršího českého poskytovatele mobilních služeb Telecom, jenž se po rebrandingu nově nazývá O2 (Matura, Lodal, 2010).

Tuzemští operátoři se samozřejmě nesoustředili pouze na hlasové služby, ale svým zákazníkům nabízeli také možnost přenášení dat. Technologie CSD na bázi přepojování okruhů byla dostupná od poloviny roku 1997 pro zákazníky Telecomu. Ten si prvenství zajistil i v případě vylepšené varianty HSCSD, jejíž spuštění se datuje do prvních měsíců nového tisíciletí. Na rozdíl od prvně zmiňované služby ji však žádný další operátor neimplementoval s tvrzením, že se soustředí až na uvedení revolučního systému GPRS, který s sebou přinesl princip přepojování paketů. Všechny ale nakonec opět předběhl Telecom, v jehož síti fungují datové přenosy GPRS od října 2000. Ke změně došlo až s nástupem poslední technologie postavené na základech původního GSM. EDGE totiž jako první svým zákazníkům přinesl T-Mobile v listopadu 2004 (Peterka, 2014). Tehdejší Oskar jej následoval na jaře příštího roku a ve stejném měsíci se přidal také Eurotel. Je však zároveň nutné poznamenat, že ten už tou dobou několik měsíců provozoval datovou síť třetí generace CDMA (Bílý, 2004).

Pokrytí populace signálem GSM je v současnosti v České republice vysoko nad 99 %, což je mimo jiné důvod proč tato technologie v konečném důsledku přežila i vývojově mladší síť třetí generace. Ty musely ustoupit mnohem rychlejším řešením v podobě 4G a 5G, jelikož provozování velkého počtu různorodých datových sítí zároveň nedává pro operátory smysl (Marek, 2021).

3.6 Mobilní síť třetí generace

Ačkoliv mobilní síť druhé generace umožňovaly bezproblémový přenos hlasu, z hlediska přenosu dat narazily velice brzy na své limity. Důvodem byly zejména rostoucí nároky uživatelů na přenosovou kapacitu, které se pojily s příchodem pokročilejších mobilní telefonů s celou řadou nových funkcí a aplikací. Proto již roku 1985 začala příprava v pořadí třetí generace mobilních sítí s pracovním názvem FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunication System) pod patronací Mezinárodní telekomunikační unie (ITU-T) (Peterka, 2014).

Zhruba o 10 let později dochází k přejmenování projektu na IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000). Číslovka 2000 v názvu přitom měla specifikovat tři základní charakteristiky nového telekomunikačního systému, který měl být spuštěn v roce 2000, měl využívat frekvenční pásmo 2000 MHz a zároveň dosahovat přenosových rychlostí až 2000 kbps. Navíc měl efektivněji využívat dostupné kmitočtové pásmo a nabídnout účinnější kódování. V Evropě má přípravu nového standardu stejně jako v případě GSM na starosti organizace ETSI. Lokální řešení pro mobilní síť třetí generace dostává jméno UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) (Pužmanová, 2004, s. 251).

Práce na něm bohužel neprobíhají podle plánu, a tak koncem roku 1998 přebírá vývoj technického řešení iniciativa 3GPP (Third Generation Partnership Project), která sdružuje hned sedm standardizačních orgánů z celého světa. Připravované řešení má vycházet z technologie GSM a navazovat na ni. Ve stejné době vzniká také druhá podobná iniciativa 3GPP2 (Third generation Partnership Project 2), která se zaměřuje na přípravu 3G specifikace hlavně pro mimoevropské regiony. Jejím výsledkem je standard CDMA2000 jakožto nástupce původního CDMAone, jenž se stejně jako GSM řadí do předcházející generace mobilních sítí (Peterka, 2014).

Úplně první verze UMTS byla vydána v roce 1999 pod označením Release 99. Další vylepšení pak přicházela postupně. Jednotlivé verze standardu se označují jako tzv. release. Původně počítalo s tím, že technologie nabídne již od začátku svou plnou podobu, která měla zahrnovat datové přenosy o rychlosti až 2 Mbps pro stacionární koncová zařízení, 384 kbps pro zařízení v pomalém pohybu, za který se považuje např. chůze a 144 kbps pro rychle se pohybující uživatele v automobilové či jiné dopravě. Realita byla ovšem zcela odlišná a 384 kbps v počátcích představovalo limit i pro nepohyblivou mobilní stanici. Provoz první

veřejné sítě na bázi UMTS byl zahájen 1. září 2001 v Japonsku tanním operátorem NTT DoCoMo (Peterka, 2014).

3.6.1 Technické specifikace UMTS

Přestože se sítě třetí generace převážně zaměřují na přenos dat, podporují také hlasové hovory, což je přesně opačný přístup v porovnání s GSM. Logicky z tohoto důvodu fungují zejména na principu přepojování paketů. Páteřní část sítě je však stále zdvojená a pro potřeby hlasových přenosů částečně pracuje také na principu přepojování okruhů. Zásadní změny nastaly z hlediska aplikované přístupové techniky, kterou už není kombinace FDMA a TDMA, nýbrž kódový multiplex CDMA (Code Division Multiple Access). Jeho výsadou je použití celé šířky kmitočtového pásma pro všechny uživatele po celou dobu vysílání. Obsah dílčích přenosů je proto nejprve zakódován. Každý z příjemců je pak schopen dekódovat jen tu část celku, která mu je náleží. Tímto způsobem dochází v rámci jednoho frekvenčního pásma k odlišení několika účastníků. Protože jsou jednotlivé kanály relativně dost široké, hovoří se ve spojitosti s 3G o W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) (Bečvář et al., 2013, s. 50).

Šířka kanálu narostla celkem 25krát až na konečných 5 MHz, což s sebou přineslo mnohem větší teoretické rychlosti. Ve srovnání s předchůdcem přináší použití W-CDMA zásadní výhodu při plánování a stavbě sítě, kdy sousední buňky nemusí z výše zmíněných důvodů používat různé frekvence, jelikož dochází k oddělení veškeré síťové komunikace prostřednictvím unikátních kódů. Důsledkem je mimo jiné tzv. měkký handover, který zaručuje snazší přechod uživatele mezi buňkami než doposud (Bečvář et al., 2013, s. 51).

Na rozdíl od předchozích generací je v případě UMTS zajištění obousměrného přenosu možné řešit hned dvěma způsoby, které se označují jako FDD-UMTS a TDD-UMTS. Zatímco frekvenční duplex FDD-UMTS (Frequency Division Duplex) vyžaduje k odlišení jednotlivých směrů komunikace párové pásmo, což je princip známý už z dob NMT a GSM, časový duplex TDD-UMTS (Time Division Duplex) si vystačí pouze s jedním nepárovým pásmem pro oba směry. Výhodou dvou sad frekvencí, se kterou pracuje FDD-UMTS je stejná přenosová kapacita v obou směrech, ze které profitují zejména hlasové služby. Datové přenosy naopak často preferují asymetričnost s vyšší rychlostí pro downlink, čemuž vychází lépe vstříc varianta TDD-UMTS, která si dostupnou přenosovou kapacitu dle vlastní potřeby rozděluje mezi oba směry .

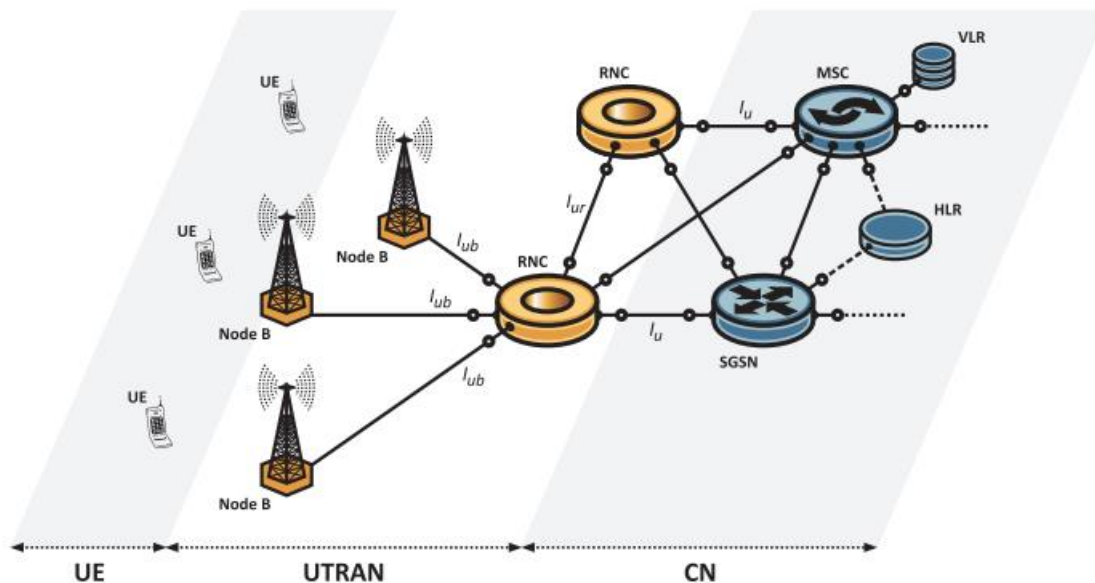
Vyhrazené frekvenční přídělky se nacházejí v pásmu 2100 MHz. Jelikož byla od začátku preferována spíše verze FDD-UMTS, dostala k dispozici mnohem větší část dostupného spektra. Konkrétní rozmezí kmitočtů se v jednotlivých částech světa může lišit. V Evropě byly pro typ využívající FDD alokovány frekvence 1920–1980 MHz pro uplink a 2110–2170 MHz pro downlink. V případě TDD-UMTS se pak jednalo o 1900–1920 MHz a 2010–2025 MHz. Šířka kanálu 5 MHz byla zachována u obou existujících variant (Bečvář et al., 2013, s. 49).

3.6.2 Architektura sítě

Síťová architektura systému UMTS se skládá ze tří hlavních částí, které se nazývají UE (User Equipment), UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) a CN (Core Network). Jejich vzájemné propojení rozhraními definovanými v 3GPP do funkčního celku znázorňuje obrázek č. 6. Zatímco rádiová přístupová síť UTRAN byla zcela nová, mnoho komponent páteřní sítě CN prošlo oproti GSM pouze dílčími úpravami. Na nejnižší úrovni stojí UE jakožto část, se kterou přichází běžně do styku uživatelé. Je tvořena mobilním terminálem (MT) a kartou USIM (UMTS Subscriber Identity Module), jež slouží k jednoznačné identifikaci účastníka v síti. Jedná o analogie MS a SIM známých z GSM (Mishra, 2018).

Ačkoliv byla rádiová přístupová infrastruktura kompletně předělána, původní koncept se základnovými stanicemi a řídicími jednotkami zůstal zachován. Jednotlivé mobilní terminály se proto připojují k uzlům s názvem Node B, které jsou obdobou původních BTS. Podobnost lze hledat i u řídicích jednotek RNC (Radio Network Controller), jež mají za úkol správu několika přidělených vysílačů Node B a zastávají tudíž stejnou roli, jakou plnily BSC v sítích GSM. Množina všech vzájemně propojených základnových stanic a řídicích jednotek dohromady tvoří přístupovou rádiovou síť UTRAN (Peterka, 2014).

Obrázek 6: Architektura sítě UMTS



Zdroj: (Bečvář et al., 2013, s. 52)

Na nejvyšší úrovni stojí páteřní síť CN, která je z logických důvodů rozdělena na dvě poloviny, které se označují jako domény. Zatímco jedna funguje na bázi přepojování okruhů, druhá na principu přepojování paketů. Některé části mezi sebou sdílejí, jiné se naopak liší. Struktura domény pro hlasové přenosy vychází z GSM sítí a doznala pouze dílčích změn. Podobná situace nastává také v případě paketově orientované domény, jejíž základ pochází z GPRS sítí. Celá část, která slouží pro přenos dat, pracuje na protokolu IP. Většina prvků plní v zásadě stejné funkce jako u starších systémů (Sauter, 2021, s. 217).

3.6.3 HSDPA

Jelikož původní verze UMTS nedosahovala očekávaných rychlostí, časem přišlo několik vylepšení, která původní technologii zrychlovala a komplexně zdokonalovala například prostřednictvím dokonalejších kódovacích technik. Pro obdobná rozšíření se později vžilo označení 3,5G. Prvním takovým dodatkem je standard HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), který byl uveden společně s UMTS Release 5 v roce 2002. Umožnil podstatně zvýšit přenosové rychlosti směrem k uživateli až na teoretických 14,4 Mbps, což znamenalo citelný nárůst oproti dosavadnímu maximu 2 Mbps, kterého v praxi ovšem stejně nebylo dosahováno. Došlo k několika změnám především v přístupové části sítě. Některé z procedur pro správu rádiových zdrojů byly přesunuty z uzlu RNC přímo

do základnové stanice, což umožnilo pružněji reagovat na požadavky jednotlivých účastníků. Dílčí úpravy s sebou mimo jiné přinesly také snížení latence (Mishra, 2018).

3.6.4 HSUPA

Společně s uvedením dalších doporučení, která byla iniciativou 3GPP zpracována do podoby UMTS Release 6 v roce 2004, přichází také značné zvýšení přenosové rychlosti na uplinku. Nová metoda je označována jako HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) a navyšuje maximum ve směru od uživatele až na teoretických 5,76 Mbps. Kromě toho rozšiřuje počet uživatelů, kteří mohou v jednu chvíli odesílat data v rámci jedné buňky (Sauter, 2021, s. 223).

Technologie HSDPA a HSUPA lze považovat za vzájemně komplementární, a proto se pro ně používá souhrnný název HSPA (High Speed Packet Access). Stejně jako v případě starších typů datových přenosů existuje i zde několik tzv. tříd, od nichž se odvíjí přenosové rychlosti, jež může zákazník očekávat. Kromě podpory na straně zařízení záleží také na formě implementace služby ze strany operátora. Základní verze se přitom omezují 1,2 Mbps pro downlink a 0,73 Mbps pro uplink, což je znatelný rozdíl v porovnání s horní hranicí toho, co může HSPA ve skutečnosti nabídnout (Sauter, 2021, s. 225).

3.6.5 HSPA+

K poslední zásadní evoluci původního systému UMTS došlo společně s verzí Release 7, jež byla kompletně vypracována do roku 2007. Nový standard se označoval jako HSPA+ a přinesl další vylepšení přenosových rychlostí v obou směrech za pomoci techniky MIMO (Multiple-input multiple-output), která efektivněji využívá dostupné kmitočtové spektrum za pomoci většího počtu vysílacích a přijímacích antén. Zároveň se lépe vypořádává s vícecestným šířením signálu, kdy dochází k jeho odrazům či útlumům, jelikož dokáže kombinovat datové toky přicházející z různých směrů v odlišném čase. Použitím MIMO ve verzi 2x2 se dvěma anténami na každé straně může dojít k navýšení přenosové rychlosti až o 100 % na hodnoty 28,8 Mbps pro downlink a zhruba 11 Mbps pro uplink (Bečvář et al., 2013, s. 49).

Další vylepšení umožnila dokonalejší a efektivnější modulace 64 QAM (Quadrature Amplitude Modulation), která ve spolupráci s technikou MIMO nadále posunula maximální přenosovou rychlost ve směru od uživatele až na 42 Mbps. Oproti starším variantám přineslo HSPA+ také značné snížení energetické náročnosti v době, kdy nejsou přijímána ani

odesílána žádná data a dochází pouze k udržování spojení. Vypracována byla dokumentace i k dalším verzím, které metodou Dual Carrier spojovaly dva frekvenční kanály do výsledné šířky pásma 10 MHz, čímž se dala opětovně zdvojnásobit přenosová rychlost až na hranici 84 Mbps. Vzhledem k brzkému příchodu modernějších LTE sítí, ale k nasazení tohoto řešení do praxe nikdy nedošlo (Peterka, 2014).

3.7 Mobilní síť čtvrté generace

HSPA i HSPA+ jsou pouze snahou o vylepšení původního UMTS zdokonalováním rádiové přístupové sítě bez podstatných zásahů do zbylých komponent. Potenciál dalšího rozvoje se tak časem v podstatě vyčerpал a bylo jasné, že musí přijít zásadnější změny, které přinesla až nová technologie LTE (Long Term Evolution). Původně se předpokládalo, že LTE bude splňovat požadavky kladené na síť čtvrté generace, jež definovala Mezinárodní telekomunikační unie v rámci standardu IMT-Advanced. Jeho základní charakteristikou měla být kromě vyšší spektrální účinnosti nebo nižší latence také požadovaná přenosová rychlost 1 Gbps pro stacionární koncová zařízení a 100 Mbps pro rychle se pohybující uživatele například v automobilové či jiné dopravě. Jelikož však ze strany LTE nedošlo ke splnění stanovených podmínek, měla by být správně označována jako pokročilejší 3G technologie, která stojí na prahu mezi oběma generacemi. Operátoři ji přesto běžně nazývají jako 4G zejména z marketingových důvodů, zatímco odborná veřejnost preferuje výraz 3,9G, který lépe vystihuje hierarchické postavení LTE ve srovnání s ostatními typy datových sítí (Peterka 2014).

Výraznou proměnou prošla páteřní síť, která na rozdíl od předchůdců není zdvojená, jelikož LTE nemá nativní podporu hlasových služeb na principu přepojování okruhů. Naopak se soustředí zejména na rychlé datové přenosy pomocí protokolu IP a efektivnější využití dostupných přenosových kapacit. Přesto však nabízí službu VoLTE (Voice Over LTE), která umožňuje realizaci hovorů způsobem, kdy se digitalizovaný hlas přenáší ve formě paketů. Výhodou je nejen zvýšení kvality a stability přenosu, ale také rychlejší spojení, větší dosah nebo možnost souběžně procházet internet. Hlasové pakety se navíc nezapočítávají do celkového objemu dat, který má uživatel k dispozici, ale účtují se podobně jako klasické hovory na základě času (Mishra, 2018).

3.7.1 Technické specifikace LTE

První verze LTE přišla společně s 3GPP Release 8 v roce 2008. V následujících letech pak obdobně jako v případě UMTS probíhalo postupné vylepšování na úroveň stanovenou standardem IMT-Advanced. Technické specifikace se v řadě ohledů od čistokrevného 3G liší. Klíčovou roli hraje zejména vyšší míra implementace již známé techniky MIMO a nahrazení původní přístupové metody W-CDMA dvojicí OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ve směru k uživateli a SC-FDMA (Single Carrier OFDMA) ve směru od uživatele. Zatímco u kódového multiplexu mají jednotlivé kanály pevně danou šířku a vysílají vcelku, OFDMA rozděluje vysílání do velkého počtu různých signálů (tzv. nosných), které se chovají nezávisle na sobě. Za účelem snahy o efektivní využití dostupného spektra jsou jednotlivé nosné umístěny velice blízko sebe až tak, že se maximum jedné může překrývat s minimem druhé. Na stejné šířce pásma se tím pádem nachází podstatně více nosných, čímž lze dosáhnout citelně vyšší propustnosti. Šířka jednotlivých kanálů je proměnlivá a pohybuje se od 1,5 MHz do 20 MHz v závislosti na okolním prostředí, kterému se OFDMA dokáže adaptivně přizpůsobovat. Každá nosná je dále dělena mezi uživateli v čase, což s sebou přináší další benefity z hlediska navýšení spektrální účinnosti (Bečvář et al., 2013, s. 67).

Pro uplink se využívá modifikované varianty OFDMA s označením SC-FDMA, která se vyznačuje zejména menší energetickou náročností, jež má kladný dopad na výdrž mobilních terminálů. Vylepšení se dočkala také technika MIMO, která nově může využívat až čtyři antény na každé straně namísto původních dvou. Novinkou je tzv. beamforming neboli tvarování paprsku, kdy dochází ke směřování vysílaných signálů pouze ve směru k uživateli na základě jeho aktuální polohy, což pomohlo dále navýšit přenosové rychlosti (Bečvář et al., 2013, s. 68).

Stejně jako UMTS dovoluje i LTE řešit problematiku obousměrného přenosu za pomoci frekvenčního (FDD) nebo časového (TDD) duplexu, přičemž rozšířenější je opět převážně první varianta. Pro samotný přenos je však vyhrazeno větší množství kmitočtových pásem, což je mimo jiné důvodem pro výslednou větší kapacitu sítě. V praxi se lze setkat zejména s pásmy 800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz a 2600 MHz. Standard 3GPP Release 8 rozděluje koncová zařízení do pěti kategorií dle schopností práce s LTE. Zároveň počítá s využíváním nanejvýš jednoho frekvenčního kanálu o zmiňované maximální šířce 20 MHz. Teoretické limity z pohledu přenosových rychlostí činí až 300 Mbps pro downlink a 75 Mbps

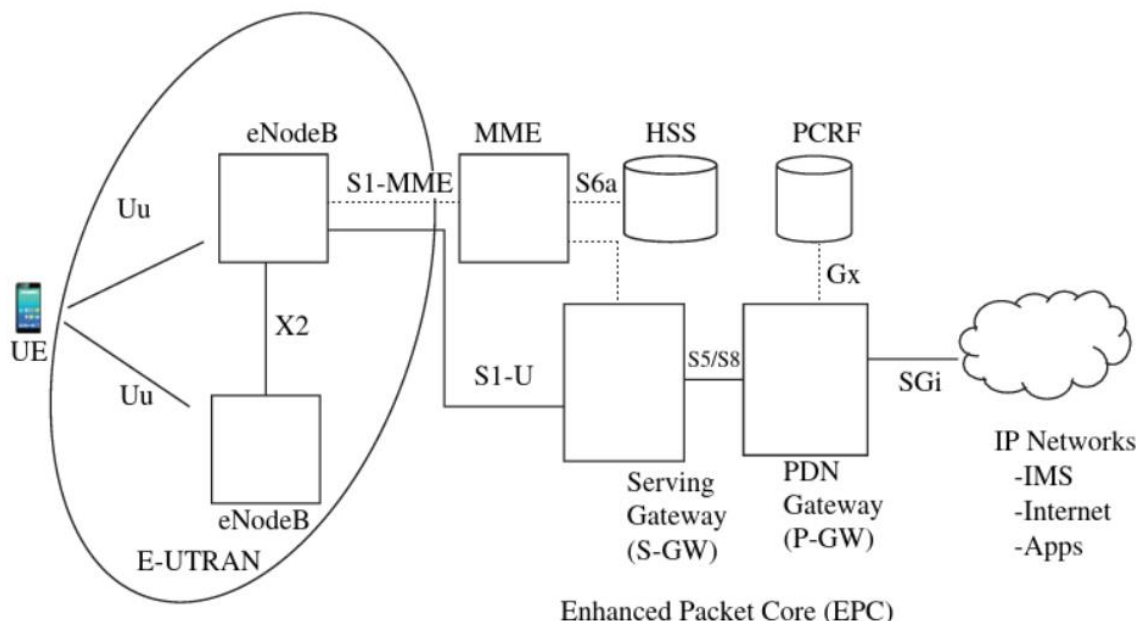
pro uplink. Jejich dosažení v běžném provozu je ale prakticky nereálné, protože se při výpočtech uvažuje jen s minimálním zatížením sítě. Stejný problém nastává u latence, která by se ideálně měla pohybovat okolo 10 ms (Peterka, 2014).

3.7.2 Architektura sítě

Architektura sítě LTE je odvozena od architektury starších GSM a UMTS sítí. Na rozdíl od nich ovšem umožňuje fungovat pouze v režimu přepojování paketů. Skládá se z přístupové části E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Access Network) a jádra sítě EPC (Evolved Packet Core). Kromě uživatelských terminálů je rádiová síť E-UTRAN nově tvořena pouze jedním typem uzlu, kterým jsou základnové stanice eNode B (Evolved Node B). Ty oproti minulosti disponují řídicí funkcí, čímž zcela odpadá potřeba jednotek RNC a existuje tak přímé spojení mezi jednotlivými prvky eNode B a EPC (Mishra, 2018).

Jádro sítě tvoří řada komponent, mezi něž patří zejména MME (Mobility Management Entity), HSS (Home Subscriber Server), S-GW (Serving Gateway) a PDN-GW (Packet Data Network Gateway). Jejich úkoly jsou často v porovnání s předchůdci velice podobné. Poslední jmenovaný slouží jako brána pro napojení do externích sítí mezi nimiž směřuje provoz. Dále se stará o přidělování IP adres, filtrování uživatelských paketů či garanci přenosové rychlosti. Na rozhraní mezi eNode B a PDN-GW stojí prvek S-GW, jehož úkoly taktéž spočívají ve směrování paketů. Identifikaci a autorizaci uživatelů či zajištění bezpečnosti přenosu dat nebo tvorbu spojení mezi sítí a terminály má na starosti MME. HSS poté představuje obdobu HLR v GSM a uchovává základní informace o uživateli. Propojení jednotlivých prvků sítě do funkčního celku ilustruje obrázek č. 7 (Sauter, 2021).

Obrázek 7: Architektura sítě LTE



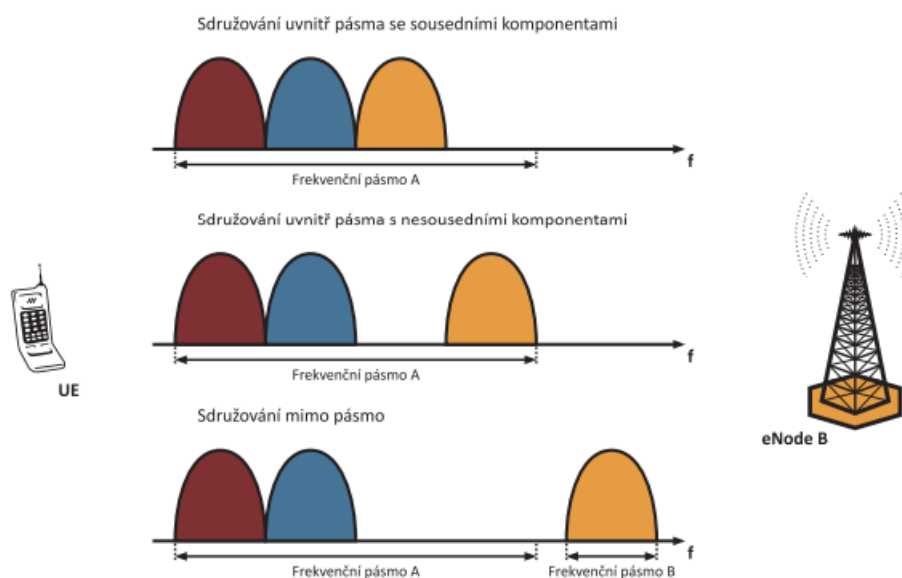
Zdroj: (Mishra, 2018)

3.7.3 LTE-A

První skutečná síť čtvrté generace, která splňuje požadavky definované v IMT-Advanced přišla společně s 3GPP Release 10 v roce 2010. Označuje se jako LTE-A (LTE Advanced) a představuje vylepšenou podobu původního LTE. Hlavní novinkou, která stojí za navýšením přenosových rychlostí a dalším snížením odezvy je současné využití několika frekvenčních kanálů technikou Carrier Aggregation neboli sdružováním nosných. Agregované frekvenční kanály se dohromady nazývají Component Carriers (CC). Maximálně lze tímto způsobem spojit pět kanálů o šířce až 20 MHz, čímž se zásadně zvedá propustnost sítě. Výsledná šířka vlnového pásma tak může v součtu dosahovat až 100 MHz. Nutná je samozřejmě také podpora sdružování nosných ze strany koncových zařízení. Za tímto účelem bylo nutné definovat další tři kategorie 6, 7 a 8 (Peterka 2014).

Každý ze sdružovaných kanálů se označuje jako nosná komponenta. Uživatelské terminály mají vždy k dispozici jednu primární komponentu a až čtyři sekundární. Zatímco primární komponenta slouží především pro trvalou signalizaci a udržování spojení, zbylé se přidávají podle nutnosti v případě, kdy jsou přenášena data. Komponenty přiřazené jednotlivým zařízením nemusí být v kmitočtové oblasti souvislé, což ilustruje obrázek č. 8. Zejména v těchto případech nachází své využití větší počet vysílacích a přijímacích antén.

Obrázek 8: Typy sdružování nosných



Zdroj: (Bečvář et al., 2013, s. 74)

LTE-A se lépe vypořádává s interferencí mezi buňkami, přináší dokonalejší kódování a nadále vylepšuje techniku MIMO pro paralelní přenos pomocí většího množství antén, kterých se může nově nacházet až osm na každé straně (8x8 MIMO). Teoretická maximální rychlost narostla až na 3 Gbps pro downlink a 1,5 Gbps pro uplink za podmínky sdružení pěti frekvenčních kanálů o celkové šířce 100 MHz. Reálné nasazení této podoby LTE-A je ovšem v podstatě vyloučeno. Operátoři totiž nejčastěji pracují s užšími kanály a současně také limitují počet nosných komponent. Technologie LTE a LTE-A jsou vzhledem k velice podobné struktuře vzájemně plně kompatibilní (Mishra, 2018).

3.8 Síť páté generace

Mobilní síť páté generace nejsou jen prostým nástupcem 4G, ale jde o komplexní skupinu sítí s různým zaměřením a v různých frekvenčních pásmech. Poprvé se do

povědomí dostaly v roce 2015 v rámci 3GPP Release 15. Zároveň s ním byl Mezinárodní telekomunikační unií (ITU-R) vytvořen nový seznam požadavků na 5G síť označovaný jako IMT-2020, který oproti staršímu IMT-Advanced představuje citelný posun kupředu. Zlepšení by se mělo týkat prakticky všech myslitelných parametrů. Technologie musí podporovat maximální přenosovou rychlost až 20 Gbps pro downlink a 10 Gbps pro uplink. V hustém městském prostředí by pak hodnoty neměly klesnout pod úroveň 100 Mbps a 50 Mbps v závislosti na směru přenosu dat (Sauter, 2021).

Mezi další klíčové novinky patří kromě opětovně vylepšené spektrální a energetické účinnosti zejména daleko větší kapacita sítě, která by měla dosahovat až jednoho milionu připojených zařízení na kilometr čtvereční. V jejím důsledku dochází k masivnímu rozvoji internetu věcí, jenž se mimo jiné pojí s chytrými městy a celou řadou automatizačních procesů napříč průmyslem. Pro správné fungování zmíněných systémů je zapotřebí také velice nízká latence, která by se u 5G měla pohybovat hluboko pod hranicí 10 milisekund. Zdokonalená síť může být díky svým parametrům zajímavým řešením i z hlediska problematiky poslední míle v případě domácností a firem, jež se nacházejí v lokalitách, kde není dostupný tradiční kabelový internet (Sauter 2021).

Minimálně zpočátku není ambicí nového standardu spojit hlasové hovory, které jsou perfektně odladěny v předchozích generacích, ale naopak se soustředit výhradně na přenos dat. Časem by přesto mohla podpora hlasu dávat smysl, protože by po několika desítkách let umožnila vypnutí technologie GSM. Uvolněná frekvenční pásma by se následně dala použít k opětovnému navýšení kapacity sítě 5G (Michlovský 2021).

3.8.1 Technické specifikace 5G

Frekvence, na kterých může 5G fungovat se dělí do dvou hlavních kategorií, jež se označují jako Sub6GHz a mmWave neboli také Frequency Range 1 a 2. Jak už název napovídá, tak první z nich v sobě ukrývá všechna použitelná pásma do 6 GHz, zatímco mmWave pracuje v znatelně širším rozmezí od 24 GHz do 100 GHz, přičemž horní hranice je spíše teoretická. Dostupný rozsah ještě více podtrhuje komplexitu 5G sítě a široké možnosti jejich využití napříč různými aplikacemi v uživatelském i profesionálním segmentu (Michlovský, 2021).

Snaha o co nejrychlejší uvedení 5G na trh na si nakonec vyžádala tvorbu hybridních řešení, která kombinují prvky nové sítě s již existující LTE infrastrukturou. Zejména v okolí

Sub6GHz pásem totiž zbývala už jen velice malá část spektra, která by ve většině částí světa nedovolila nasazení sítí páté generace bez toho, aniž by na sobě s předchůdcem vzájemně neparazitovaly. Poprvé v historii tak bylo umožněno, aby mezi sebou dvě technologie sdílely stejné frekvence, k čemuž dochází za pomoci techniky DSS (Dynamic Spectrum Sharing). Její implementace vyžaduje provedení pouze dílčích hardwarových vylepšení současných vysílačů, čímž značně usnadňuje operátorům přechod na nový standard (Michlovský 2021).

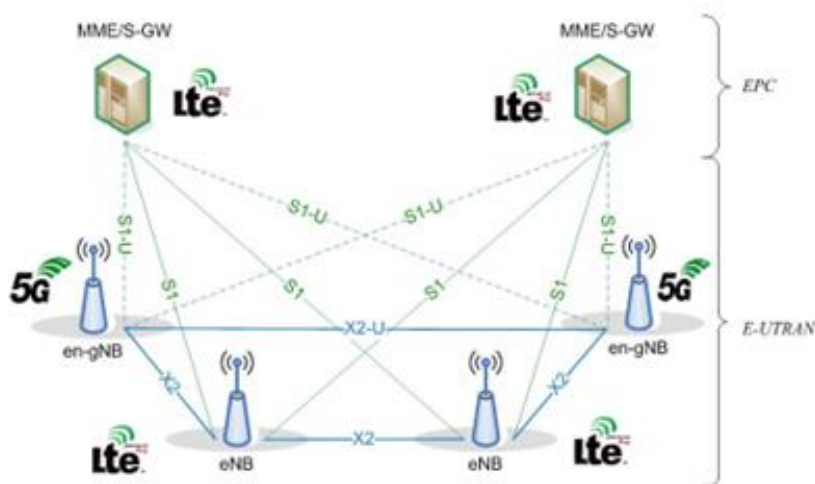
K dosud využívaným LTE pásmům 800 MHz, 1800 MHz a 2100 MHz se nově přidávají také kmitočty v okolí 700 MHz a 3500 MHz. Zatímco první z nich našel uplatnění především ve venkovských oblastech s menší hustotou obyvatel, pásmo 3500 MHz operátoři nasazují výhradně ve městech, kde jsou kladeny mnohem větší nároky na celkovou kapacitu sítě. Milimetrové vlny (mmWave) pak mají v porovnání se všemi jmenovanými ještě menší dosah a znatelně horší průchodnost signálu materiálem. I přesto však mohou dobře posloužit k tvorbě pevného spoje mezi dvěma body na vzdálenost maximálně jednotek kilometrů, nebo k pokrytí oblastí s vysokou koncentrací lidí. Příkladem mohou být obchodní centra, sportovní stadiony nebo metro, kde je zdánlivá nevýhoda v podobě krátkého dosahu spíše plusem. Jednotlivé základnové stanice totiž prakticky nemají šanci se mezi sebou ovlivňovat. Důležité je ovšem konstatovat, že v dobách, kdy ještě neexistovala technika MIMO by bylo vysílání na těchto frekvencích z důvodu nízké prostupnosti signálu prakticky vyloučeno. (Michlovský 2021)

Maximální šířka jednoho kanálu pro pásma z kategorie Sub6GHz činí 100 MHz. Oproti předchůdci tak došlo k nárůstu o 400 %. V případě mmWave se pak šířka kanálu může vyšplhat až na hodnoty v řádech stovek MHz. Zatímco technologie LTE využívala pro každý směr komunikace jinou přístupovou metodu, u 5G dochází z tohoto pohledu ke sjednocení. Nová přístupová metoda se nazývá CP-OFDMA (Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing) a vznikla lehkou modifikací svého předchůdce. Obousměrný přenos je realizován za pomoci frekvenčního (FDD) nebo časového (TDD) duplexu (Sauter, 2021, s. 663). Jedno z posledních z celé řady vylepšení se týká techniky MIMO, která je u 5G přítomna ve variantě mMIMO (Massive MIMO), jež se vyznačuje současným použitím až 64 antén zejména pro downlink (Sauter, 2021, s. 658).

3.8.2 Architektura sítě

Z výše zmíněných důvodů jsou rozlišovány dva druhy síťové architektury, které svými názvy odpovídají jednotlivým fázím implementace. První se označuje jako 5G-NSA (5G Non-Standalone) a lze považovat za mezikrok v procesu nasazování 5G do praxe, jelikož nadále využívá jádro sítě LTE a metodou DSS s ní sdílí některé frekvence. Samotná přístupová rádiová síť se nazývá 5G-NR (5G New Radio) a jejími hlavními stavebními pilíři jsou základnové stanice gNode B (Next Generation Node B). Schéma fungování 5G-NSA znázorňuje obrázek č. 9.

Obrázek 9: Architektura sítě 5G-NSA

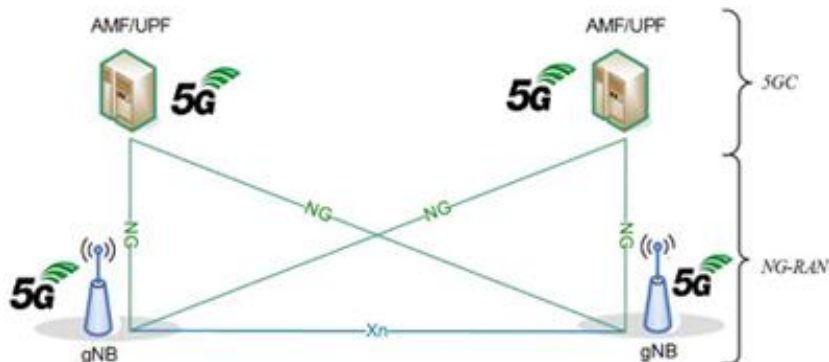


Zdroj: (Sultan, 2022)

Druhá varianta, která již v plném měřítku stojí na nových komponentech se nazývá 5G-SA (5G Standalone) a je znázorněna na obrázku č. 10. Veškeré prvky, které mohly představovat úzké hrdlo byly odstraněny. Přístupová síť se nově označuje jako NG-RAN (New Generation Radio Access Network) a jádro sítě jako 5G NGC (5G New Generation Core). Role jednotlivých komponent v systému zůstávají povětšinou zachovány. Na rozdíl od prvního druhu architektury je v tomto zapojení možné čerpat všech výhod 5G a využít plný potenciál, který nabízí. Blízká budoucnost by měla patřit právě 5G-SA sítím a jejich většímu rozšíření, k čemuž bude ale potřeba nemalých investic zejména do páteří infrastruktury. O nástupci v podobě 6G se zatím příliš nemluví, ačkoliv některé země již zahájily vlastní výzkum a provádějí testy v laboratorních podmínkách. Přenosové rychlosti by se měly dle

dostupných informací vyšplhat až na vyšší stovky gigabitů za sekundu. Nasazení do ostrého provozu však nelze v brzké době očekávat.

Obrázek 10: Architektura sítě 5G-SA



Zdroj: (Sultan, 2022)

3.8.3 Sítě páté generace v ČR

Komerční provoz první 5G sítě na našem území byl zahájen 1. července 2020 operátorem O2. Služba v té době byla dostupná pouze v centru Prahy a v Kolíně. Jako druhý v pořadí následoval 1. října 2020 Vodafone. Novou technologii si hned od začátku mohli vyzkoušet jeho zákazníci v Praze, Brně, Karlových Varech, Jeseníku a Ústí nad Labem. Nejpozději se přidala společnost T-Mobile, která spustila 5G vysílání v Praze a Brně k 1. listopadu 2020 (Michlovský, 2021).

Ve všech zmiňovaných případech se jednalo o typ 5G-NSA, který využívá některé prvky starší LTE sítě a o pásmo se s ní dělí pomocí technologie DSS. Vysílání tedy probíhalo na stejných frekvencích, zejména pak v okolí 800 MHz, 1800 MHz a 2100 MHz. Důležitým milníkem byla aukce kmitočtových pásem 700 MHz a 3500 MHz, která proběhla koncem roku 2020 a přinesla zcela nové možnosti při budování 5G infrastruktury. V průběhu roku 2021 pak postupně docházelo k vypínání 3G sítí v pásmu 2100MHz, což umožnilo nadále navýšit kapacitu sítě ve prospěch LTE a 5G (Michlovský, 2021).

K plošnému nasazení výkonnější 5G-SA varianty zatím nedošlo. V současnosti však probíhá její testování v podobě privátních kampusových sítí na českých univerzitách nebo například v areálu Škoda Auto v Mladé Boleslavi. Vůbec první taková síť byla spuštěna začátkem srpna 2021 v Českém institutu informatiky, robotiky a kybernetiky (CIIRC) pražského ČVUT a pokrývá plochu zhruba 1000 m² (Michlovský, 2021).

Podle posledních informací z počátku roku 2024 by měla nejlepší dostupností 5G připojení disponovat společnost Vodafone, která má aktuálně pokryto 56 % území ČR, což odpovídá zhruba 83 % populace.

Velmi srovnatelné pokrytí má také nejstarší český operátor O2, jehož 5G signál je dostupný pro 81 % populace na 51 % území České republiky. Ze srovnání s Vodafone plyne, že se O2 pravděpodobně více zaměřilo na městské oblasti s větším počtem obyvatel, jelikož rozdíl v územním pokrytí činí 5 %, zatímco v případě převodu této hodnoty na procenta populace je méně než poloviční.

Informace od posledního z trojice hlavních poskytovatelů mobilních služeb v ČR, kterým je T-Mobile, nejsou natolik detailní. Poslední zpráva z prosince 2023 hovoří o pokrytí 70 % populace, což představuje nárůst o 20 procentních bodů ve srovnání s předchozím rokem. Údaje vztažené k rozloze území nejsou bohužel dostupné.

4 Vlastní práce

Jako hlavní cíl práce si autor vymežil zhodnocení aktuálního stavu mobilních datových sítí ve vybraných lokalitách České republiky. Na základě poznatků získaných v předchozích kapitolách byla proto navržena komplexní měření, provedeny praktické testy a sesbírána konkrétní data v celé řadě obcí napříč zájmovou oblastí. Důraz byl kladen především na několik předem vybraných parametrů internetového připojení, jež se staly podkladem pro následnou komparaci. Ta proběhla hned na několika úrovních a poskytla dostatek vypovídajících údajů pro stanovení relevantních závěrů práce.

4.1 Metodika sběru dat

Před začátkem praktického testování bylo nezbytně nutné vybrat oblast, které se bude týkat. Její rozloha se odvíjela od snahy autora získat napříč konkrétními lokalitami co nejrelevantnější výsledky pro následnou komparaci. Ke splnění této podmínky ideálně přispívá malá vzdálenost mezi jednotlivými místy, která se měření účastní. Z tohoto důvodu se práce zaměřuje na menší územně-správní celek, v rámci něhož bylo alespoň částečně možné eliminovat externí vlivy v podobě rozdílné denní doby, počasí, a především momentálního vytížení sítě během sběru dat, což jsou důležité aspekty, jež se v konečném důsledku podílí na výsledcích testování.

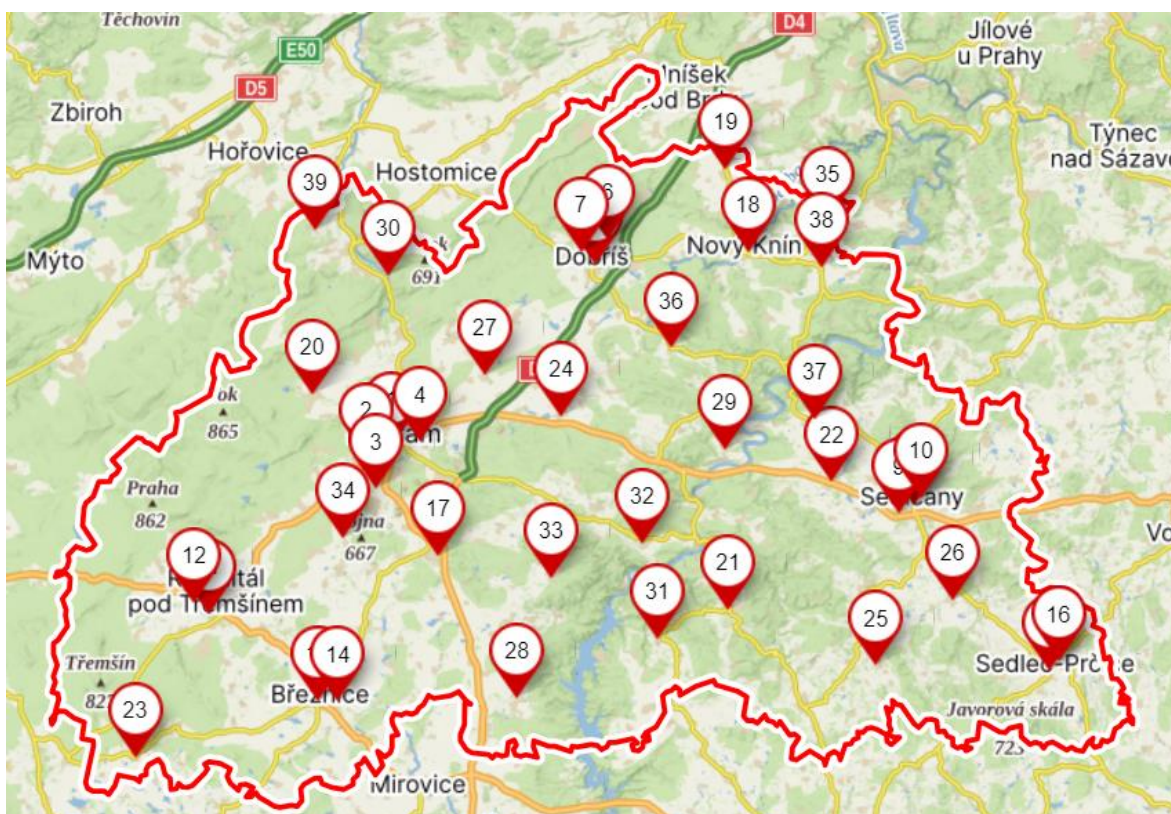
Zvoleným regionem se nakonec stal okres Příbram o rozloze 1563 km², což z něj dělá největší okres Středočeského kraje a třetí největší v republice. Tomu však neodpovídá poněkud menší počet obyvatel, který činí jen zhruba 118 tisíc. Jeho příčinou je oproti zbytku kraje nižší hustota zalidnění, jež má spojitost s velkým podílem lesů. Tento ukazatel je však do velké míry ovlivněn pohořím Brdy, jehož přítomnost na druhou stranu umožnila výběr lokalit s rozmanitou nadmořskou výškou zejména v porovnání s obcemi podél řeky Vltavy. Od rozhodnutí zvolit menší oblast zájmu si autor slibuje především získání lepší a detailnější představy o celkovém stavu mobilních datových sítí na vybraném území, jelikož si mohl za stejný časový úsek dovolit analyzovat situaci na více místech než v případě kraje či dokonce celé republiky.

Z celkového počtu 120 obcí bylo pro měření vybráno 29 z nich. Seznam zahrnoval všech osm měst, která se ve zvoleném okrese nachází. Dále obsahoval sídla různé velikosti od 150 do zhruba 2 000 obyvatel. Během výběru byl kladen důraz na jejich rovnoměrné rozmístění na mapě, stejně jako na odlišnosti v případě nadmořské výšky a sousedících

přírodních překážek, jež mohou ovlivňovat přenos signálu. Nebyly opomenuty ani odlehlejší lokality v brdských lesích.

V okresním městě Příbram bylo testování provedeno celkem na čtyřech místech. O jedno méně bylo vyhrazeno pro Dobříš a Sedlčany jakožto obce s rozšířenou působností. Rožmitál pod Třemšínem, Březnice a Sedlec-Prčice pak disponovaly přesně polovičním přidělem v porovnání s Příbramí. Ve zbytku obcí posloužil k měření pouze jeden konkrétní bod. Zpravidla se jednalo o náves či její okolí. V mnohých případech šlo přímo o prostranství před obecním úřadem. U prvně zmíněných zástupců se experiment soustředil nejdříve na centrální náměstí a dále pak na sídliště či do okrajových částí. Veškerých 39 bodů je graficky znázorněno v mapě na obrázku č. 11.

Obrázek 11: Mapa lokalit měření a jejich umístění v rámci zvolené oblasti



Zdroj: Vlastní zpracování

Dle dat Českého statistického úřadu o počtu obyvatel v obcích k 1. 1. 2023 žije ve vybraných lokalitách celkem 75 042 obyvatel, což představuje asi dvě třetiny z celého okresu. Detailní přehled včetně specifikace umístění měřicího bodu v rámci dané sídelní jednotky poskytuje tabulka č. 2.

Tabulka 2: Přesný seznam lokalit měření

Obec (počet obyvatel)	Přesná lokalita
Příbram (32 743)	náměstí T. G. Masaryka
	náměstí J. A. Alise
	Brodská (Albert)
	Žižkova (Orlen)
Dobříš (8831)	Mírové Náměstí (MěÚ)
	K Židovskému hřbitovu
	Schartova
Sedlčany (6833)	náměstí T. G. Masaryka
	Pod Cihelným vrchem
	Zberazská
Rožmitál pod Třemšínem (4336)	Náměstí (MěÚ)
	Starý Rožmitál (autobusová zastávka)
Březnice (3554)	Náměstí (MěÚ)
	U Blatenky
Sedlec-Prčice (2942)	náměstí 7. května
	Vítkovo náměstí
Milín (2248)	Obecní úřad
Nový Knín (2132)	náměstí Jiřího z Poděbrad
Nová Ves pod Pleší (1505)	parkoviště naproti OÚ
Obecnice (1255)	parkoviště COOP
Krásná Hora nad Vltavou (1106)	Městský úřad
Dublovice (1076)	Obecní úřad
Hvožďany (790)	Obecní úřad
Višňová (700)	Obecní úřad
Nechvalice (665)	Nechvalická hospoda
Nedrahovice (476)	Obecní úřad
Suchodol (411)	parkoviště naproti OÚ
Kozárovice (407)	parkoviště naproti OÚ
Hřimězdice (387)	restaurace U Jezírka
Čenkov (377)	Obecní úřad
Milešov (325)	autobusová zastávka
Zduchovice (310)	Obecní úřad
Smolotely (288)	autobusová zastávka
Narysov (282)	Obecní úřad
Nové Dvory (276)	Obecní úřad
Drhovy (273)	Obecní úřad
Křepenice (212)	Obecní úřad
Korkyně (153)	autobusová zastávka
Křešín (149)	u rybníka (naproti OÚ)

Zdroj: Vlastní zpracování

Veškerá prováděná měření byla statická, aby se předešlo potenciálním výkyvům, které by pohyb mohl způsobit. Pro sjednocení metodiky napříč lokalitami byl tento faktor klíčový stejně jako fakt, že se veškeré aktivity odehrávaly v exteriéru, aby se zamezilo případné horší prostupnosti signálu, k níž dochází například uvnitř budov nebo dopravních prostředků.

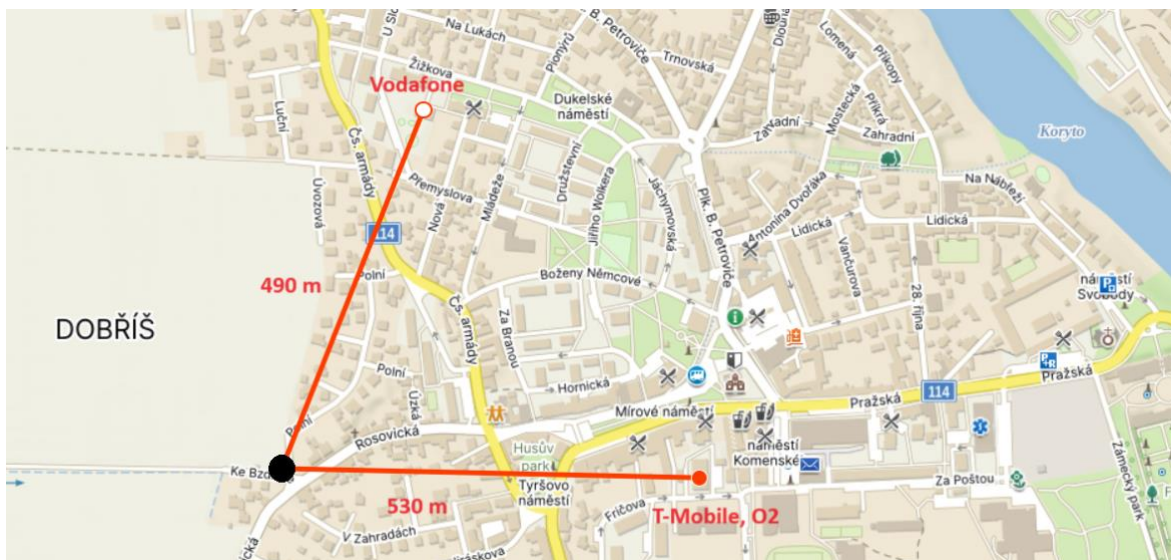
Sběr dat probíhal ve třech po sobě jdoucích pracovních dnech v únoru 2024. V rámci každého dne byl pro testování vyhrazen určitý časový úsek. Tento postup byl zvolen ve snaze o vytvoření rovnocenných podmínek. Dostupná kapacita sítě a s ní spojené aktuální vytížení se totiž v průběhu dne mění. Rozdíl mezi hodnotami získanými ráno, v poledne a večer může být značný. Omezením měření na předem stanovený časový interval bylo dosaženo lepších možností vzájemné komparace dosažených výstupů i za předpokladu, že pocházejí z jiného dne. Za tímto účelem se sběr dat odehrával vždy v pozdějších odpoledních a podvečerních hodinách. Venkovní teplota se pohybovala v rozmezí 2–10 °C. Po celou dobu bylo polojasno bez deště či sněhových srážek.

Testování se neomezovalo pouze na mobilní síť jednoho operátora. Ve všech lokalitách byly zjišťovány parametry připojení pro tři největší poskytovatele v České republice, kterými jsou T-Mobile, O2 a Vodafone. Jejich společný tržní podíl se dle výroční zprávy Českého telekomunikačního úřadu z roku 2022 pohybuje na úrovni 92,4 %. Veškeré zbylé subjekty (virtuální operátoři) využívají přenosové kapacity někoho ze zmíněné trojice, a proto by jejich zařazení do experimentu postrádalo smysl. Znalosti informací o připojení a technickém stavu infrastruktury v daných místech následně posloužily jako kvalitní podklad k získání komplexní představy, jež vedla k finálnímu zhodnocení současné situace. Zapojení většího množství operátorů navíc poskytlo mnohem hlubší možnosti analýzy výsledků.

Na všech lokacích bylo provedeno celkem 12 měření, což odpovídá čtyřem pro každého ze zúčastněných poskytovatelů. Tyto pokusy si mezi sebou rovným dílem rozdělily dva softwarové nástroje. Nejprve byl oběma z nich v rychlém sledu realizován jeden test připojení, načež se situace opakovala s odstupem 5–7 minut. Celkový počet měření se tak při 39 místech vyšplhal na 468.

Aby bylo možné později stanovit, zda získaná data představují potenciální maximum, či spíše průměrný výsledek, kterého je možné v dané lokalitě docílit, byl dodatečně proveden test za účelem monitoringu vytížení sítě v různou denní dobu. K tomu byla vybrána speciální lokalita na území města Dobříše, která jinak nebyla součástí výše zmíněné sady 39 bodů. Důvodem byla přímá viditelnost na vysílače všech operátorů a jejich prakticky shodná vzdálenost od místa sběru dat, jež ilustruje obrázek č. 12. V průběhu dne zde bylo v rámci 4 návštěv realizováno celkem 48 měření, což znamená, že byla dodržena stejná metodika jako ve všech ostatních případech. Záznamy byly postupně pořízeny ráno (8–9 h), v poledne (12–13 h), odpoledne (16–17 h) a večer (20–21 h). Následná analýza poskytla další úhel pohledu na celkové výsledky a usnadnila stanovení relevantních závěrů.

Obrázek 12: Poloha místa pro monitoring vytížení sítě vzhledem vysílačům



Zdroj: Vlastní zpracování

4.2 Hardwarové vybavení

Pro měření byl využíván mobilní telefon Samsung Galaxy S21 FE 5G, který v době testování disponoval nejnovější možnou verzí operačního systému Android 14 s nadstavbou One UI 6.0 a únorovou bezpečnostní aktualizací. Mozek zařízení tvoří čipset Snapdragon 888 5G amerického výrobce Qualcomm. Jeho součástí je modem Snapdragon X60 5G s anténním modulem QTM535. Jak už název napovídá, tak podpora sítí páté generace a starších je v tomto případě bez problému zajištěna. Osazený hardware si hravě poradí se standardem Sub-6GHz i mmWave. Jejich rozdíl spočívá zejména v maximální přenosové

rychlosti, která je u mmWave znatelně vylepšena, jelikož pracuje s frekvenčními pásmy v řádu vyšších desítek GHz, zatímco druhá varianta spoléhá na kmitočty do 6 GHz. Naopak dosah a průchodnost signálu materiálem je znatelně lepší u Sub-6GHz.

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, tak technologie milimetrových vln není zatím v ČR dostupná. Z pohledu možných přenosových rychlostí tak nepředstavuje modem X60 5G s až 7,5 Gbit/s pro download a 3,5 Gbit/s pro upload svými parametry absolutně žádné omezení pro testovaný region. Tuzemští mobilní operátoři se v současné době ve svých reklamních kampaních a na webu ani zdaleka nechlubí podobnými hodnotami, z čehož vyplývá značná technická rezerva. Vhod při měření přišla také podpora funkce dual SIM, jež dovoluje uživateli osadit dvě SIM karty naráz a jednoduše mezi nimi přepínat.

Za účelem snahy o eliminaci externích vlivů bylo zařízení vyjmutο z ochranného krytu. Po dobu testování byla vždy spuštěna jen příslušná aplikace pro sledování kvality poskytovaných služeb. Veškeré aktualizace na pozadí byly předem zakázány. Měření probíhala ve výšce zhruba 120 cm nad povrchem.

4.3 Softwarové vybavení

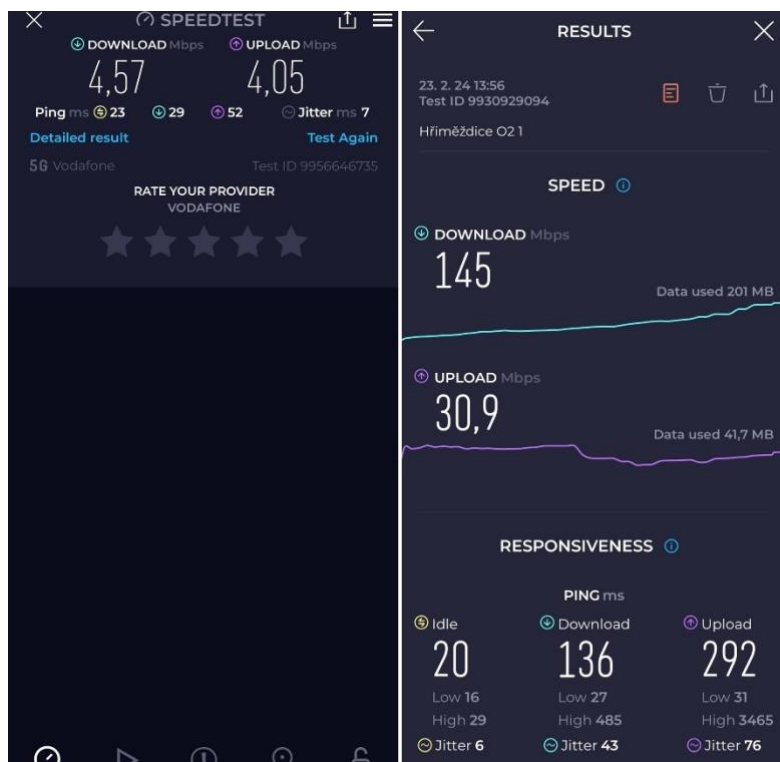
Výstupem pro každou z lokalit byla data ze tří softwarových nástrojů. Dva sloužily pro sledování předem určených parametrů internetového připojení a byla v nich prováděna samotná měření, zatímco třetí poskytoval detailnější informace týkající se základnových stanic nebo síly a kvality signálu.

První aplikace ze zmiňované dvojice se nazývá Speedtest by Ookla a uživatelům je dostupná již od roku 2006. Jedná se pravděpodobně o nejznámější softwarový nástroj pro monitoring kvality internetového připojení na světě. Pro účely práce byly v tomto případě sledovány a zaznamenávány hodnoty download a upload v Mbit/s a ping a jitter v milisekundách.

Ačkoliv aplikace poskytuje v základním nastavení také informace o metrice packet loss, která představuje procento nedoručených paketů v porovnání s pakety odeslanými, pro další analýzy nebyla uvažována. V místech s pokrytím mobilním signálem, kde se podařilo měření úspěšně realizovat se totiž její hodnota nikdy nevychýlila mimo výchozích 0 %.

Software se po dobu experimentu nacházel ve verzi 5.3.3. Ukázku prostředí aplikace se zaměřením na zobrazení souhrnných i detailních výsledků znázorňuje obrázek č. 13.

Obrázek 13: Uživatelské rozhraní aplikace Speedtest by Ookla

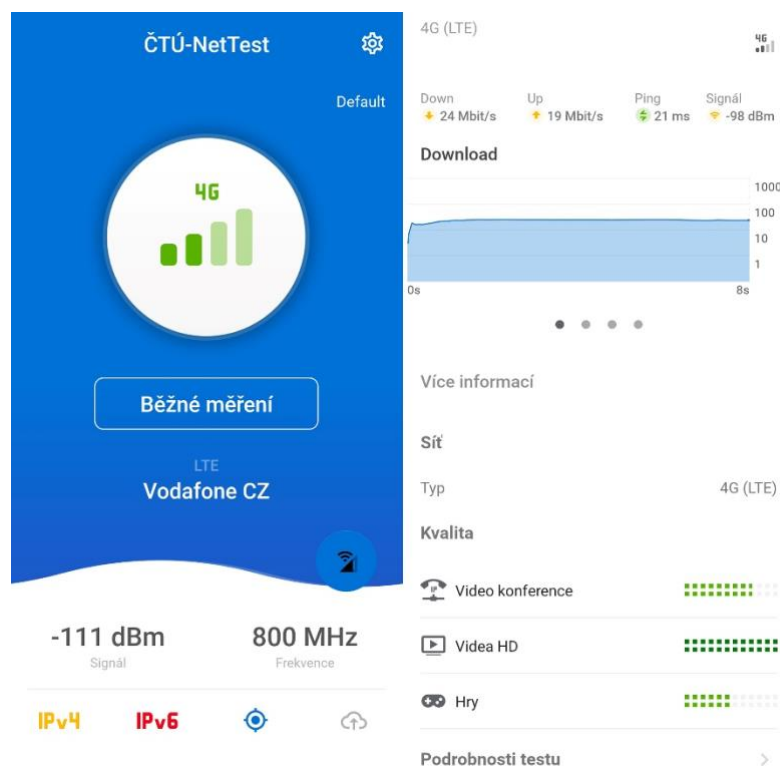


Zdroj: Vlastní zpracování

Pro získání kvalitnějších a přesnějších výstupů byly veškeré testy v krátkém čase opakovány za pomoci nástroje ČTÚ-NetTest ve verzi msek-25, jehož provozovatelem je přímo Český telekomunikační úřad. V konečném důsledku se tak zdvojnásobil celkový počet pokusů pro každou lokalitu, čímž bylo ošetřeno, že potenciální výkyvy naměřených hodnot v jednotkách případů nebudou mít zásadní vliv na hodnocení celku.

Výhodou aplikace je možnost provádění certifikovaných měření, na základě kterých lze v případě opakovaných a dlouhotrvajících potíží žádat o reklamaci kvality služeb u poskytovatele. Funkce se však logicky omezuje výhradně na pevné připojení v domácnostech a zde tak nemohla být využita. ČTÚ-NetTest posloužil ke sledování velice podobné sady parametrů jako u dříve popsánoho nástroje Speedtest by Ookla. Konkrétně se jednalo o download, upload, ping a nově také sílu signálu reprezentovanou ukazatelem RSRP. Úvodní obrazovka aplikace a náhled na detail pokusu jsou k vidění na obrázku č. 14.

Obrázek 14: Uživatelské rozhraní aplikace ČTÚ-NetTest

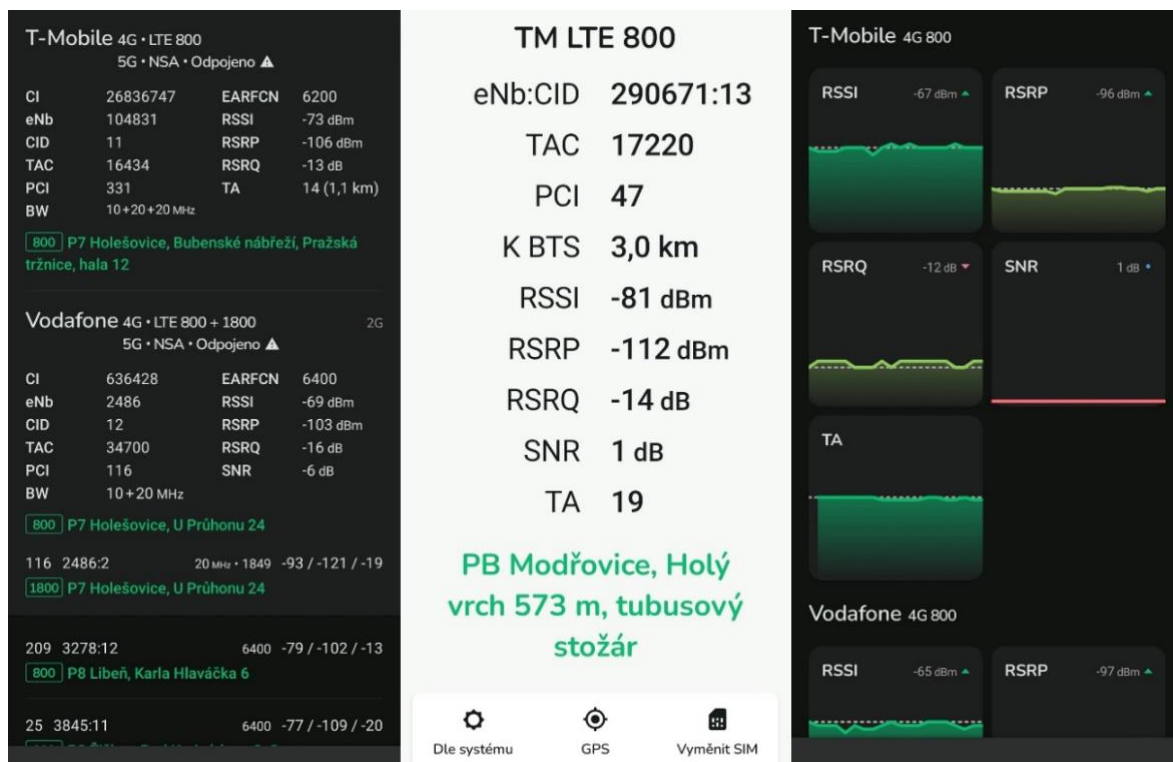


Zdroj: Vlastní zpracování

Poslední program, jenž se na testování podílel se nazývá NetMonster. Jeho specializace se od zbytku poněkud liší, protože neumožňuje provádět měření rychlosti připojení k internetu. Na druhou stranu poskytuje celou řadu jiných důležitých a zajímavých údajů. V první řadě se jedná o typ sítě a frekvenční pásmo. Dále pak o název, identifikační číslo a vzdálenost základnové stanice, ke které je momentálně zařízení připojeno.

Stejně jako v předchozím případě uživateli poskytuje informace o síle signálu RSRP, navrch však přidává další ukazatele, mezi něž patří RSSI či RSRQ. Jejich vývoj lze navíc sledovat i několik desítek sekund zpět v čase pomocí grafů. Nástroj se po dobu sběru dat nacházel ve verzi 2.23.6. Jeho uživatelské rozhraní a zmiňované funkce ilustruje obrázek 15.

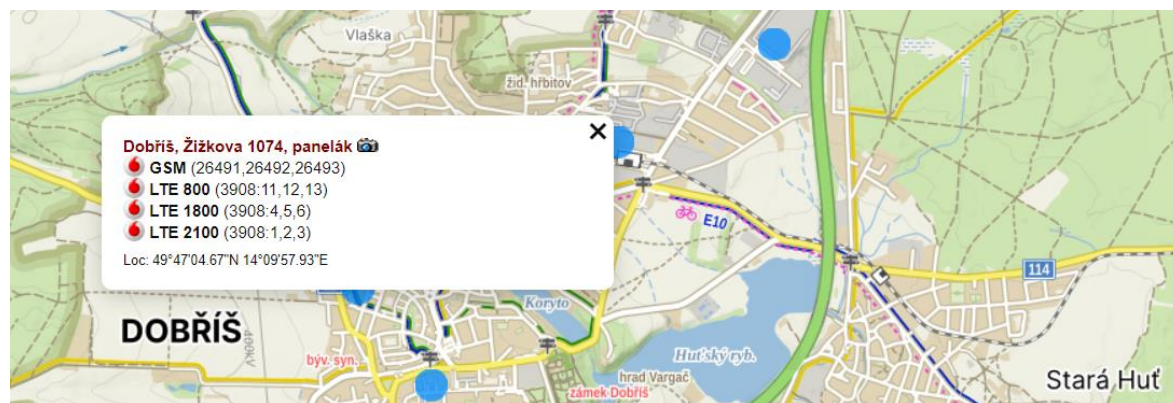
Obrázek 15: Uživatelské rozhraní aplikace NetMonster



Zdroj: Vlastní zpracování

Jako doplněk pro práci a ověřování informací o vysílačích sloužila internetová stránka gsmweb.cz, která nabízí mimo jiné interaktivní mapu všech základnových stanic. Jejich databáze je sdílená s aplikací NetMonster. Ačkoliv se jedná o nekomerční projekt a seznam BTS spravuje komunita, nebyla v dostupných údajích za celou dobu nalezena žádná chyba a zdroj šlo tím pádem považovat za spolehlivý. Ukázka detailních informací o jednom z vysílačů je k vidění na obrázku č. 16.

Obrázek 16: Detail základnové stanice v interaktivní mapě



Zdroj: Vlastní zpracování

4.4 Využití služby operátorů

Provádění velkého počtu měření je velice náročné zejména na objem přenášených dat. Z tohoto důvodu bylo nejprve pro všechny tři mobilní operátory nutné zajistit odpovídající balíčky služeb, které nebudou svými parametry představovat pro následné testování žádná omezení. Při jejich výběru tak byl kladen důraz nejen na neomezený datový limit, ale zároveň na případné restrikce v oblasti maximální rychlosti přenosu. V některých případech totiž dochází k jejímu umělému snižování ze strany poskytovatelů. Výsledkem je, že zákazníci nemohou naplno využít potenciál nejmodernějších sítí. Zvolené kombinace služeb byly za tímto účelem s operátory předem telefonicky diskutovány, aby se ověřila jejich vhodnost pro tento experiment.

Pro připojení do sítě T-Mobile posloužil Tarif 1 Pro Firmu bez závazku, který ovšem sám o sobě nesplňuje výše zmíněné podmínky. Proto byl navíc doplněn o balíček s názvem Data Extra neomezeně na den, který nepředstavuje žádná omezení ani v jednom z klíčových aspektů a měl by zajistit dosahování nejlepších možných výsledků za daných okolností.

U operátora O2 byla situace velmi podobná. Základem však nebyl žádný tarif, ale předplacená karta GO Neomezené volání. Nástrojem, který umožnil vyhovět nastaveným požadavkům se i zde stal dodatečný balíček, tentokrát s označením Data naplno. Ten po dobu 24 hodin od zakoupení zaručuje maximální možné přenosové rychlosti v kombinaci s neomezeným datovým limitem.

Připojení do sítě našeho nejmladšího operátora bylo zajištěno pomocí studentského tarifu #jetovtobě Basic+, který vyjma neomezených dat nabízí také neomezené volání a SMS. Jedinou překážkou byla přenosová rychlost, která je v tomto případě limitována na 4 Mbps oběma směry. Součástí nabídky je ale možnost jejího navýšení až teoretické na maximum po dobu následujících 24 hodin. K tomuto kroku může zákazník přistoupit až 5x do měsíce.

4.5 Metodika zpracování dat

Díličí výsledky měření za jednotlivé lokality byly po dobu sběru dat ukládány přímo do databáze ve vybraných aplikacích a současně popisovány za účelem jejich snazšího rozlišení do budoucna. Jakmile byly podklady kompletní, došlo k jejich přepisu do prostředí tabulkového procesoru Microsoft Excel. Na obrázku č. 17 je k vidění úplný záznam pro

jednu z obcí, který v sobě integruje výstupy ze všech použitých softwarových nástrojů a zároveň barevně odlišuje data konkrétních mobilních operátorů.

Obrázek 17: Kompletní záznam pro jednu z vybraných lokalit

Obec (počet obyvatel)	Lokalita měření	Operátor	Měřicí nástroj	BTS ID	BTS název	Vzdálenost k BTS (km)	Typ sítě	Pásmo (MHz)	Download (Mbps)	Upload (Mbps)	Ping (ms)	Jitter (ms)	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)
Milešov (325)	autobusová zastávka	T-Mobile	Speedtest.net	292411	Bohostice - Lavičky, Čistá 507 m, příhradový stožár nad přehradou Orlík	4,4	LTE	800	6,3	1	49	25	-87	-115	-11
			CTU-NetTest						5,7	0,5	27				
			Speedtest.net						5,1	2,9	29				
			CTU-NetTest						6	2	21				
		O2	Speedtest.net	292411	Bohostice - Lavičky, Čistá 507 m, příhradový stožár nad přehradou Orlík	4,4	LTE	700	23,6	5	20	2	-79	-108	-8
			CTU-NetTest						11	2	25				
			Speedtest.net						18,1	6	23				
			CTU-NetTest						18	6	20				
		Vodafone	Speedtest.net	5661	Kosobudy, příhradový stožárek v ZD	1,6	LTE	800	16	8,8	22	12	-77	-104	-8
			CTU-NetTest						15	7,8	20				
			Speedtest.net						11,8	7,1	23				
			CTU-NetTest						21	4,9	20				

Zdroj: Vlastní zpracování

Vzniklý soubor dat posloužil jako základ pro následnou statistickou analýzu, jež byla provedena ve stejnojmenném počítačovém programu. Za pomoci dostupných funkcí byly vypočteny potřebné míry polohy a variability pro vybrané ukazatele. Zároveň došlo k určení absolutních a relativních četností výskytu konkrétních hodnot znaku zejména pro parametry Typ sítě a Pásmo. Tímto způsobem si autor vytvořil ucelenou představu o situaci ve zvolené oblasti. Získané poznatky z teoretické části společně s výsledky měření poté vedly ke stanovení závěrů za účelem naplnění hlavního cíle práce.

5 Výsledky a diskuze

Předpokladem pro zajištění vysokého standardu kvality poskytovaných služeb v daném místě je odpovídající stav tamní přenosové infrastruktury, který lze ověřit za pomoci mapy pokrytí. Tu nabízí všichni zapojení operátoři a zpravidla se dělí na několik vrstev reprezentujících jednotlivé technologie přenosu dat v mobilních sítích. Po zadání konkrétní adresy tak není problém získat lepší přehled o dostupnosti internetového připojení a alespoň hrubou představu o rychlostech přenosu, které může uživatel očekávat.

Ačkoliv jsou mapy pokrytí výsledkem počítačové simulace a nemusí proto být 100% přesné, tak by se proklamované údaje neměly od těch reálných nijak zásadně lišit. Pro ověření této hypotézy byly informace z webových stránek porovnány se skutečným stavem zjištěným během měření aplikací NetMonster za účelem odhalení případných nepřesností. Zkoumání se týkalo zejména sítí čtvrté a páté generace včetně LTE, protože jiné standardy se v současné době již nepoužívají nebo je vzhledem k technickým parametrům nelze ani za ideálních podmínek považovat za dostačující k provádění většiny běžných úkonů s výjimkou textové komunikace. Zástupcem této skupiny je hlavně technologie EDGE, která už je z dnešního uživatelského pohledu považována za značně nevyhovující.

Obrázek 18: Výřez z tabulky s informacemi o udávaném a skutečném pokrytí

Lokalita	Udávané pokrytí						Skutečné pokrytí					
	T-Mobile		O2		Vodafone		T-Mobile		O2		Vodafone	
	LTE	5G	LTE	5G	LTE	5G	LTE	5G	LTE	5G	LTE	5G
Příbram, náměstí TGM	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ČÁST
Příbram, náměstí J. A. Alise	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Příbram, Brodská (Albert)	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Příbram, Žižkova (Orlen)	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE
Dobříš, Mírové Náměstí (MěÚ)	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Dobříš, K Židovskému hřbitovu	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Dobříš, Schartova	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Sedlčany, náměstí TGM	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Sedlčany, Pod Cihelným vrchem	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ČÁST	ANO	NE	ANO	ČÁST
Sedlčany, Zberazská	ANO	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ČÁST	ANO	ANO	ANO	ANO
Rožmitál pod Třemšínem, náměstí	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Rožmitál pod Třemšínem, Starý Rožmitál	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO

Zdroj: Vlastní zpracování

Přebrané i vlastními silami zjištěné údaje o pokrytí byly zaneseny do tabulky, jejíž výřez znázorňuje obrázek č. 18. Zatímco při ověřování přes webové rozhraní nebyl problém jednoznačně potvrdit či vyvrátit dostupnost připojení v dané oblasti, v realitě docházelo

k situacím, které vedly k nutnosti přidání třetí možnosti ohodnocení. Občas se totiž v rámci jedné lokality stávalo, že se zařízení průběžně přepojovalo mezi dvěma vysílači nebo na základě aktuálních podmínek upřednostnilo při některých pokusech starší technologii na úkor novější. Pokrytí sítěmi páté generace bylo v takových případech považováno za částečné, jelikož k němu došlo pouze u poloviny získaných vzorků.

Kompletní souhrn zjištěných informací o udávaném pokrytí poskytuje tabulka č. 3, kde jsou sledované ukazatele rozděleny do tří řádků. Hodnoty na prvních dvou z nich jsou si zdánlivě podobné a jediný rozdíl je pozorovatelný u operátora O2. Z výsledků je možné vyčíst, že alespoň jedna ze sledovaných technologií byla dostupná na 37 místech z celkových 39.

Tabulka 3: Souhrnné údaje o udávaném pokrytí

Udávané pokrytí lokalit	T-Mobile		O2		Vodafone	
	Počet míst	% z celku	Počet míst	% z celku	Počet míst	% z celku
Udávané pokrytí LTE/LTE-A/5G	39	100 %	37	94,9 %	38	97,4 %
Udávané pokrytí LTE/LTE-A	39	100 %	36	92,3 %	38	97,4 %
Udávané pokrytí 5G	27	69,2 %	28	71,8 %	18	46,2 %

Zdroj: Vlastní zpracování

Vzhledem k tomu, že se autor po celou dobu testování setkával se standardem 5G pouze ve variantě NSA, která využívá jádro starší LTE sítě a o přenosové kapacity se v rámci určitého frekvenčního pásma s předchůdcem dělí, šlo předpokládat, že přítomnost nejnovější technologie bude automaticky indikovat také výskyt té původní. Ačkoliv tuto domněnku splňovali dva poskytovatelé, v případě O2 nebyla minimálně v teoretické rovině pravdivá. Obec Křešín měla totiž údajně disponovat pokrytím pouze za pomoci 5G, což se stalo důvodem k nutnosti rozpadu prvního řádku na dvě poloviny.

Nejlepší dostupnost internetového připojení slibuje na papíře uživatelům operátor T-Mobile, který se prezentuje pokrytím všech 39 vybraných lokalit za pomoci mobilní datové sítě LTE či novější. Naopak nejhůře by si měl v tomto ohledu vést poskytovatel O2, který deklaruje přístup do své sítě zákazníkům celkem na 37 místech. Všechny varianty se na první pohled zdají být téměř rovnocenné. U 5G se ale situace prudce mění a vzájemné diference se zvětšují ve prospěch dvou výše zmiňovaných. Rozdíl v pokrytí ve srovnání

s nejmladším tuzemským operátorem by měl být patrný zejména v obcích od 400 do 1200 obyvatel, kde Vodafone oproti zbytku citelně ztrácí. Dostupnost jeho nejpokročilejších datových služeb v rámci celého regionu pak stěží atakuje 50% hranici.

Informace o zjištěném stavu na základě provedených měření shrnuje tabulka č. 4. V první řadě nebyl dle očekávání zjištěn rozpor s technickými předpoklady, které vylučují přítomnost 5G signálu v místech, která zároveň nejsou pokryta pomocí technologie LTE. Jedná se o důsledek využití architektury 5G NSA, která částečně stojí na komponentech původní sítě čtvrté generace. V tomto ohledu se tak nepotvrdily informace týkající se obce Křešín, jež uváděl operátor O2 na svém webu. Zobrazení vrchních dvou řádků tabulky zůstalo neměnné pouze za účelem objasnění předešlé situace, ačkoliv už se v současné době může jevit jako zbytečné.

Tabulka 4: Souhrnné údaje o zjištěném pokrytí

Zjištěné pokrytí lokalit	T-Mobile		O2		Vodafone	
	Počet míst	% z celku	Počet míst	% z celku	Počet míst	% z celku
Zjištěné pokrytí LTE/LTE-A/5G	39	100 %	39	100 %	37	94,9 %
Zjištěné pokrytí LTE/LTE-A	39	100 %	39	100 %	37	94,9 %
Zjištěné pokrytí 5G	18	46,2 %	19	48,7 %	17	43,6 %
Zjištěné částečné pokrytí 5G	4	10,3 %	2	5,1 %	2	5,1 %

Zdroj: Vlastní zpracování

Nalezená chyba se však celkovém kontextu zdá být ojedinělá. Pokrytí vybraných lokalit alespoň jedním ze sledovaných standardů bylo totiž u dotčeného poskytovatele dokonce lepší než původně inzerované. Internetové připojení tak bylo oproti očekáváním k dispozici také pro obyvatele obcí Milešov a Drhovy. Zejména v druhém případě jsou ovšem jeho parametry poněkud tristní.

Spolehnout se dalo na údaje společnosti T-Mobile, u níž byla zjištěna dostupnost datových služeb na všech 39 místech v regionu, což je totožný výsledek jako u operátora O2. Nejhůře si v porovnání s konkurenty vedl Vodafone, pro jehož zákazníkům zůstalo jakékoliv připojení k síti na dvou lokacích zcela zapovězeno. Konkrétně se jednalo o obce Kozárovice a Křešín, pro něž bylo maximem přerušované a tím pádem také velice nestabilní spojení realizované prostřednictvím technologie EDGE. Rozdíl oproti předpokladům byl

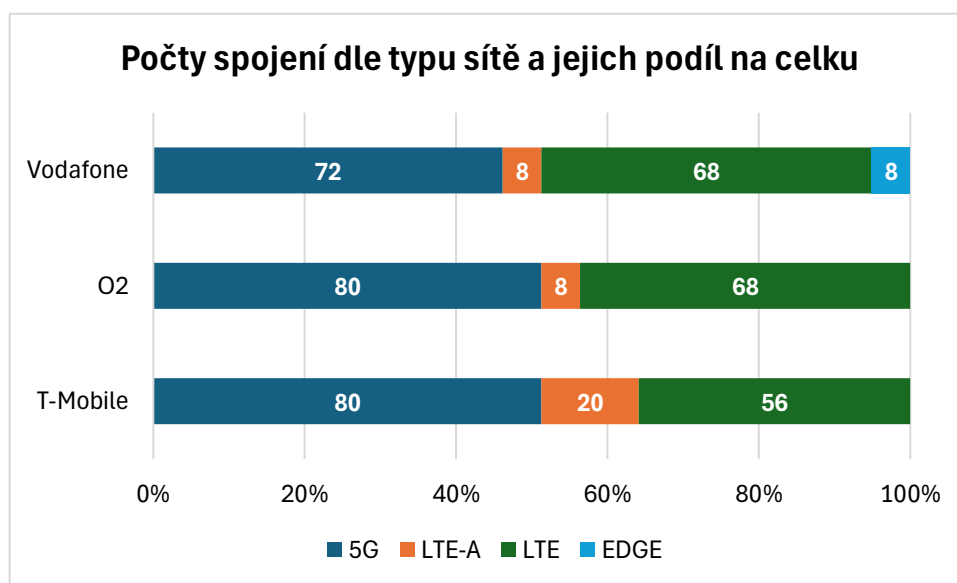
sice v absolutním vyjádření nejmenší možný, přesto se však jednalo o jediný posun směrem k horšímu napříč sledovaným spektrem.

Co se týká pokrytí oblasti sítěmi páté generace, zde už se realita od slibů lišila mnohem zásadněji. V kontextu předchozích řádků však paradoxně nejméně u operátora Vodafone, jenž obhájil svá tvrzení o dostupnosti v 17 z 18 případů. V lokalitě, která tvoří nerovnost mezi těmito hodnotami byla přítomnost 5G alespoň částečná. Stejný úkaz byl k vidění také v centru Příbrami na náměstí T. G. Masaryka. Zde se ale jednalo o nečekaný projev nad rámec původních předpovědí.

Přestože se společnosti O2 a T-Mobile na první pohled chlubily mnohem lepšími daty, ve skutečnosti se obě propadly jen kousek nad úroveň, kterou stanovil Vodafone. Zatímco první jmenovaný si oproti předpokladům pohoršil zejména v malých městech, T-Mobile se potýkal s problémy převážně na vesnicích. Ačkoliv jsou jejich celkové výsledky stále kousek lepší než u operátora Vodafone, tak se informacím z map pokrytí nedalo tolik důvěřovat, o čemž svědčí shodný pokles o zhruba 20 procentních bodů.

Jelikož v celé řadě obcí byla dostupnost 5G připojení pouze částečná a o zbylá měření se tak podělily starší technologie, mezi nimiž ovšem nebylo dosud rozlišováno, dávalo smysl převést celkový počet spojení za jednotlivé standardy pro každého operátora do podoby skládaného pruhového grafu č. 1.

Graf 1: Počet spojení dle typu sítě a jejich podílu na celku



Zdroj: Vlastní zpracování

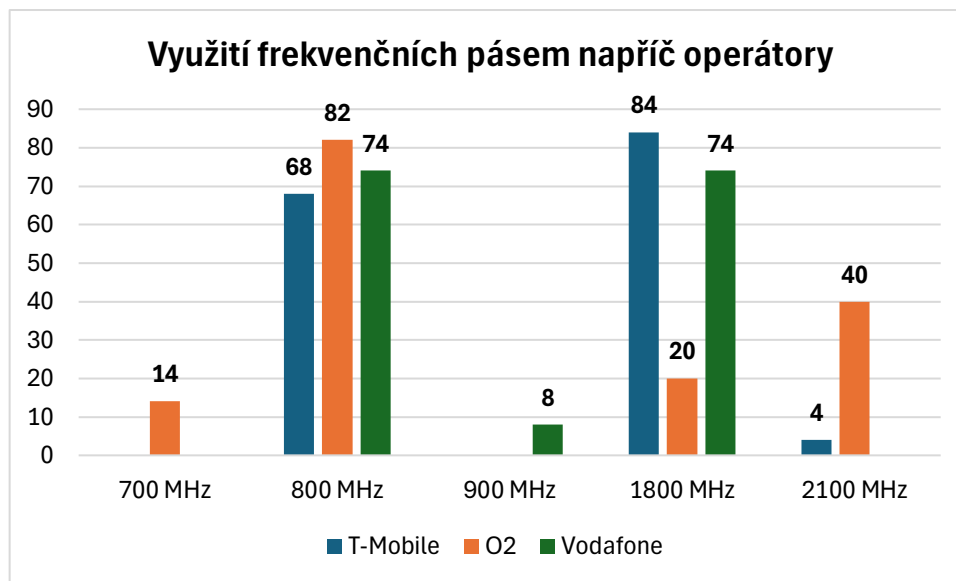
Ten pro každého poskytovatele zobrazuje počet testů provedených za přispění konkrétní datové služby a vyjadřuje, jakým způsobem se tyto dílčí části podílely na celku, který byl vždy tvořen 156 záznamy. Pokud by novější technologie automaticky znamenala záruku lepších výsledků, pak by si za naměřené hodnoty pravděpodobně vysloužila ocenění společnost T-Mobile. Protože však konečný uživatelský zážitek závisí také na mnoha dalších aspektech, nelze jen na základě těchto informací prozatím vyvodit obecně platné závěry.

I tak ale grafické znázornění velice dobře poslouží k získání přehledu o stavu přenosové infrastruktury daných operátorů napříč regionem. Z tohoto hlediska se vskutku nejlépe jeví T-Mobile, který na rozdíl od Vodafone v žádné z vybraných obcí nespolehá na dávno překonaný standard EDGE. Oproti O2 pak sice nemá navrch, co se týká 5G, ale profituje z většího počtu míst s pokrytím LTE-A, což je norma, kterou zbylé dvě společnosti na testovaném území příliš nepoužívají. Z globálního pohledu bylo internetové připojení prostřednictvím mobilních datových sítí LTE nebo novějších bez ohledu na operátora dostupné v 98,3 % případů.

Jedněmi z hlavních parametrů, od kterých se odvíjí, jakých přenosových rychlostí bude možné dosahovat, jsou vyjma použité technologie také zvolené frekvenční pásmo ve spojení se vzdáleností od vysílače a přítomnost nejrůznějších překážek, které hrají roli pokaždé, když není možné docílit přímé viditelnosti mezi mobilní a základnovou stanicí. Jejich vlivem může docházet k ohybu, odrazu nebo rozptylu vysílaných rádiových vln.

Přestože každá generace mobilních datových sítí má zpravidla k dispozici hned několik speciálně vyhrazených kmitočtových pásem, již v průběhu testování bylo patrné, že se většina měření odehrává zejména v oblastech 800 MHz a 1800 MHz. Zároveň se jednalo o jediná dvě pásma, na která autor práce narazil u všech operátorů alespoň jednou. Kompletní přehled počtu záznamů příslušících ke konkrétní frekvenci a poskytovateli nabízí skupinový sloupcový graf č. 2.

Graf 2: Využití frekvenčních pásem napříč operátory



Zdroj: Vlastní zpracování

Převaha ve využívání dvou zmiňovaných pásem ve srovnání se zbytkem je zcela zřejmá. Společně se na celku podílejí z 85,9 %. Vůbec nejčastěji se v aplikaci NetMonster, s jejíž pomocí byl údaj sledován, objevovala hodnota 800 MHz, kterou zařízení ve spolupráci se základnovou stanicí volilo bezmála v polovině případů (47,9 %). Obecně lze konstatovat, že v akci byly především nižší frekvence. Pravdivost tvrzení dokládá také fakt, že výskyt pásem 2600 MHz, 3500 MHz nebo dokonce 3700 MHz nebyl za celou dobu zaregistrován.

Zjištěný trend je z největší části dílem výběru lokalit hlavně venkovského typu, pro které jsou typické vzdálenosti k vysílačům v řádu jednotek kilometrů. V takových případech hraje roli zejména důraz na dobrou prostupnost signálu prostředím, jež zajistí právě volba nižší frekvence na úkor maximálních přenosových rychlostí. Touto optikou by se na první pohled zdát divné opomíjení kmitočtového pásma 700 MHz, které je zastoupeno pouze 14 měřeními v síti operátora O2. Důvod je přesto zcela zřejmý. Zatímco aukce frekvencí v pásmu 800 MHz proběhla v ČR již koncem roku 2013, pro dotyčné kmitočty v okolí 700 MHz se obdobný proces odehrál až o 7 let později s přechodem TV vysílání na standard DVB-T2. V mezidobu byla v pásmu 800 MHz vybudována významná část současné přenosové infrastruktury mimo velká města, z čehož pramení četnější zastoupení této varianty.

Do značné míry obdobná situace nastala u společností T-Mobile a Vodafone, které shodně sázely výhradně na pásma 800 MHz a 1800 MHz. Jedinou odchylku představovala v případě T-Mobile čtyři měření v obci Sedlec-Prčice realizovaná prostřednictvím sítě LTE-A na frekvenci 2100 MHz. Druhý dotčený pak byl v oblastech se špatným pokrytím odkázán na technologii EDGE, která pracuje v pásmu 900 MHz. Ani jednou však podíl těchto skupin na všech provedených testech pro daného poskytovatele výrazným způsobem nepřekonal hranici pěti procent.

U operátora O2 bylo množství využitých kmitočtů poněkud rozmanitější. Zajímavě působí především významné zapojení pásma 2100 MHz, k čemuž docházelo převážně ve městech. Dohromady se jednalo o 40 záznamů, které představují zhruba 25 % z celku. Pokud bylo zařízení připojeno do sítě 5G, pak téměř v polovině případů (47,5 %) volilo pro komunikaci se základnovou stanicí právě frekvenci v blízkosti 2100 MHz, což je značná odlišnost ve srovnání s konkurenty. Logicky naopak klesl podíl využití pásma 1800 MHz na bezmála 13 procentních bodů. Společnost O2 byla zároveň jediná, u které byl detekován výskyt kmitočtů v oblasti 700 MHz, jež posloužila k šíření nejen LTE, ale také 5G signálu.

Vzhledem k tomu, že se většina základnových stanic skládá z komponent, které jim umožňují současně operovat hned v několika pásmech, tak konečná volba vhodného komunikačního rozhraní úzce souvisí se vzdáleností mezi vysílačem a mobilním telefonem. Ta se standardně pohybuje v řádu stovek metrů či jednotek kilometrů. Podle dřívějších výsledků pokrytí vybraného regionu, by se dalo očekávat, že o prvenství z hlediska nejmenší průměrné vzdálenosti k BTS budou soupeřit zejména společnosti T-Mobile a O2. Paradoxně nejlepších výsledků ale dosáhl operátor Vodafone s průměrnou hodnotou 1,8 km, přestože dostupnost jeho služeb byla ve srovnání s oběma konkurenty horší. S odstupem 180 m následoval T-Mobile a až třetí místo obsadilo O2 jakožto nejstarší tuzemský poskytovatel mobilních služeb.

Pro úplnost a odstranění případného vlivu odlehlých či extrémních hodnot byl vypočten také medián, jenž dělí řadu výsledků srovnaných podle velikosti na dvě stejně početné skupiny. Na dřívější pořadí ovšem tento krok neměl zásadní dopad. Víteztví opět patřilo společnosti Vodafone. Zbylí dva operátoři dosáhli shodného výsledku 1,3 km. Zpozorovaný rozdíl mezi aritmetickými průměry a mediány ale naznačil, že v souborech převažují nižší hodnoty oproti vyšším, o čemž svědčí také kladné koeficienty šikmosti.

Zároveň se ale ukázalo, že data všech operátorů obsahují odlehlé záznamy, které vychylují průměr směrem vpravo.

Zdaleka největší dopad na průměrné hodnoty měla měření z obce Nové Dvory. Vzdálenost od vysílačů se zde pohybovala napříč operátory v rozmezí 9,1 km až 21 km, k čemuž se v žádné jiné lokalitě za celou dobu testování nepodařilo ani přiblížit. Důvodem bylo pravděpodobně umístění tamního obecního úřadu, jenž se nacházel na kopci, kde přílehlé prostranství poskytovalo skvělý výhled do okolní krajiny bez větších přírodních překážek. Už jen vyjmutím tohoto bodu by došlo ke snížení průměrných vzdáleností od BTS na zhruba 85 % až 90 % původních hodnot. Detailní přehled všech zmiňovaných variant nabízí tabulka č. 5.

Tabulka 5: Souhrnné údaje o vzdálenostech od BTS

Vzdálenost k BTS (km)	T-Mobile	O2	Vodafone
Aritmetický průměr	1,98 km	2,16 km	1,80 km
Aritmetický průměr bez obce Nové Dvory	1,80 km	1,82 km	1,51 km
Medián	1,30 km	1,30 km	1,00 km

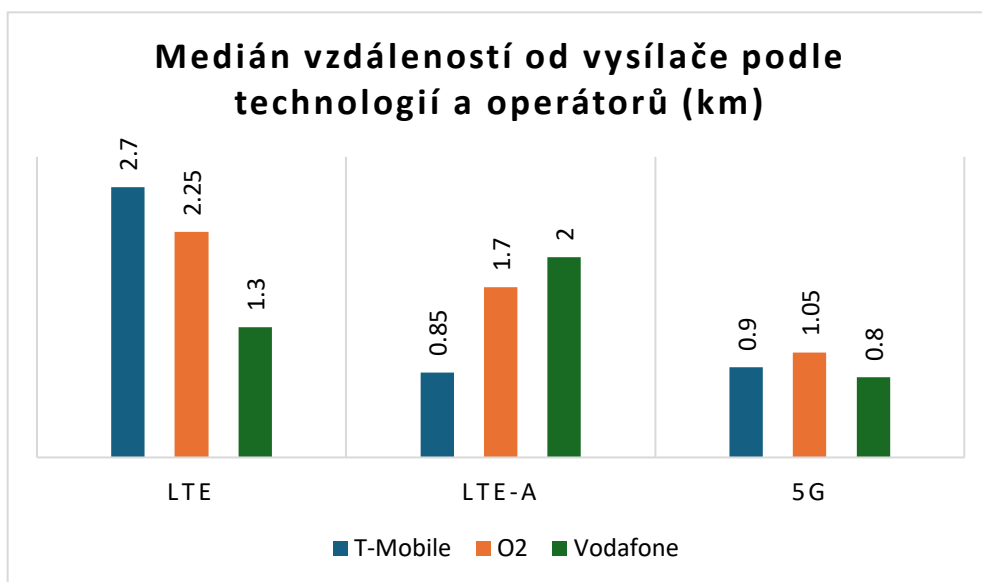
Zdroj: Vlastní zpracování

Za účelem zevrubnější komparace byla následně provedena také analýza dílčích složek reprezentujících konkrétní technologie přenosu dat. Ve snaze o eliminaci vlivu odlehlých hodnot na konečné výsledky byl tentokrát určován pouze medián. Obecně lze konstatovat, že menší vzdálenost od vysílače v průměru indikuje připojení k modernějšímu typu datové sítě. Součet hodnot všech operátorů v jednotlivých částech skupinového sloupcového grafu č. 3 totiž roste společně se stářím daného standardu.

Vzniklý diagram pomohl autorovi objasnit, co stálo za celkovým prvenstvím společnosti Vodafone a v čem naopak ostatní zaostávali. Největší rozdíl je pozorovatelný u technologie LTE, která se stala klíčem k tvorbě konečného náskoku oproti konkurenci, jelikož výsledky v kategorii 5G byly velice vyrovnané. Norma LTE-A zároveň nedisponovala dostatečným počtem záznamů proto, aby se jí povedlo s pořadím ještě nějak zamíchat. Obrácený efekt ale měla v případě operátora T-Mobile, kde se s její pomocí i díky

většímu zastoupení podařilo snížit ztrátu vzniklou u LTE, což nakonec vedlo k totožnému výsledku, kterého dosáhl poskytovatel O2.

Graf 3: Mediány vzdáleností od vysílače podle technologií a operátorů



Zdroj: Vlastní zpracování

Při výpočtech v tabulce č. 5 samozřejmě nebylo opomenuto ani 8 pokusů v rámci dvou lokalit, při nichž se mobilní telefon v síti Vodafone uchýlil k internetovému připojení prostřednictvím technologie EDGE. Jelikož se ale ve srovnání s ostatními jednalo o anomálii, nemělo smysl tuto skutečnost zahrnovat do následného grafu.

Poté co byly důkladně rozebrány alespoň některé ze základních aspektů připojení k mobilní datové síti, mezi něž se řadí použitý standard, frekvenční pásmo a vzdálenost od vysílače, jejichž vzájemná kombinace má zásadní vliv na finální uživatelskou zkušenost, nastal čas vyhodnotit nejčastěji sledované parametry, kterými jsou download, upload, ping a jitter.

Souhrnné výsledky se zprvu týkaly pouze lokalit, ve kterých bylo možné provést požadované testy. Obce Kozárovice a Křešín z tohoto důvodu nemohly být v případě operátora Vodafone do výpočtů zahrnuty, jelikož zde nebyla vyjma informací o typu sítě, kmitočtovém pásmu a vzdálenosti od BTS pořizena žádná data. Ve snaze o zaručení rovných podmínek byla později analýza provedena stejným způsobem také pro konkurenty, aby se eliminoval možný negativní dopad tamních výsledků na konečné pořadí.

Tabulka 6: Průměrné hodnoty sledovaných parametrů připojení k internetu

Průměr	Download (Mbps)	Upload (Mbps)	Ping (ms)	Jitter (ms)
T-Mobile	87,8	35,4	30,8	13,2
O2	100,3	26,9	26,3	10,0
Vodafone	128,3	37,1	23,9	12,7

Zdroj: Vlastní zpracování

Hodnoty zjištěny první metodou se zahrnutím maximálního možného počtu lokalit pro každého z poskytovatelů znázorňuje tabulka č. 6. První místo opanovala ve třech ze čtyř případů společnost Vodafone. Pouze kolísání a výkyvy latence v čase byly v průměru o 2,7 ms lepší u O2, které by tak mělo disponovat nejlepší stabilitou připojení. V rychlosti stahování a nahrávání souborů ovšem dominoval Vodafone, jehož náskok je nejviditelnější především u prvního ze jmenovaných parametrů, kde dosáhl o 46 % lepšího výsledku než poslední T-Mobile. Právě operátor spadající do skupiny Deutsche Telekomn nevynikal téměř v žádném aspektu, ačkoliv jeho ztráta už nikde nebyla tak razantní.

Tabulka 7: Průměrné hodnoty sledovaných parametrů připojení pro 37/39 lokalit

Průměr pro 37/39 lokalit	Download (Mbps)	Upload (Mbps)	Ping (ms)	Jitter (ms)
T-Mobile	87,6	36,9	30,6	12,7
O2	104,2	28,1	26,4	10,1
Vodafone	128,3	37,1	23,9	12,7

Zdroj: Vlastní zpracování

Jak je patrné z tabulky č. 7, tak provedení stejných výpočtů nad množinou pouhých 37 lokalit i v případě poskytovatelů T-Mobile a O2 konečné pořadí nijak neovlivnilo. Výsledky pochopitelně nedoznaly žádných změn u společnosti Vodafone, která měla totožný počet míst k dispozici také v předchozím kroku. Operátor O2 si polepšil z hlediska rychlosti stahování a nahrávání v průměru o 3,9 Mbps a 1,2 Mbps. O zanedbatelnou desetinu milisekundy naopak zaostal ve dvou zbývajících parametrech, jež sledují latenci a její chování v čase. Jeho konkurent označený růžovou barvou zaznamenal progres ve sloupci upload a ping, zatímco ve zbylých dvou metrikách lehce oproti dřívějšímu ztratil.

Pro úplnost byl následně vypočten také medián. Variantu s maximálním možným počtem zapojených lokalit shrnuje tabulka č. 8. Ve srovnání s aritmetickým průměrem si

všichni zástupci povětšinou udržely svá umístění v rámci hodnocených parametrů připojení. K jediné změně došlo v případě položky download, kde se tentokrát na druhou pozici za Vodafone vyšplhal operátor T-Mobile. Stejně jako u analýzy vzdálenosti mezi základnovou stanicí a mobilním telefonem byl i zde vyzorován rozdíl při současném pohledu na průměr a medián, který prozradil že v záznamech o rychlostech stahování a nahrávání převládají napříč poskytovateli nižší hodnoty oproti vyšším. Zejména údaje z lokalit s 5G pokrytím ovšem průměr oproti mediánu vychylují směrem vpravo.

Tabulka 8: Mediány sledovaných parametrů připojení k internetu

Medián	Download (Mbps)	Upload (Mbps)	Ping (ms)	Jitter (ms)
T-Mobile	61,6	23,5	27,0	8,0
O2	44,9	20,0	23,5	5,0
Vodafone	72,4	26,5	22,0	6,0

Zdroj: Vlastní zpracování

Změn doznaly také poslední dva sloupce týkající se odezvy. Kladné koeficienty šikmosti opět dokládají převahu nižších hodnot. Z jiného úhlu pohledu se ale parametry ping a jitter svým chováním lišily. Zatímco u prvně jmenovaného nabýval medián pro všechny telekomunikační společnosti alespoň 85 % příslušné hodnoty aritmetického průměru, druhý se při stejné metodice pohyboval pouze okolo hranice 50 %. Z tohoto důvodu nejsou vůči sobě sledované míry polohy v případě metriky jitter natolik vychýlené, což dokládají také mnohem menší variační koeficienty uvedené v přílohách práce.

Vypuštění obcí Kozárovice a Křešín nepřineslo ani tentokrát žádný zvrat v konečném pořadí, o čemž svědčí tabulka č. 9. Operátor T-Mobile zaznamenal malý pohyb směrem k lepšímu z hlediska rychlosti nahrávání. U O2 stojí za zmínku nárůst hodnoty metriky download o 3,2 Mbps, který indikuje, že výsledky z vynechaných lokalit spadaly spíše do první poloviny spektra.

Tabulka 9: Mediány sledovaných parametrů připojení pro 37/39 lokalit

Medián pro 37/39 lokalit	Download (Mbps)	Upload (Mbps)	Ping (ms)	Jitter (ms)
T-Mobile	61,6	24,1	27,0	8,0
O2	48,1	21,0	23,5	5,0
Vodafone	72,4	26,5	22,0	6,0

Zdroj: Vlastní zpracování

Pro získání lepší představy o tom, co stojí za výše popisovaným umístěním operátorů v rámci čtyř sledovaných oblastí, byly vypočteny také průměrné hodnoty parametrů za jednotlivé technologie, o nichž pojednává tabulka č. 10. Jelikož vyjmutí dvou lokalit s nekompletními záznamy nemělo na výsledky společností O2 a T-Mobile zásadní dopad, zůstala tentokrát množina bodů co možná největší. Zohledněna tudíž byla pouze nucená úprava datového souboru operátora Vodafone na konečný počet 37 lokací, což je o dvě méně oproti zbytku.

Tabulka 10: Průměrné hodnoty parametrů připojení dle technologií a operátorů

Průměrné hodnoty parametrů dle technologií (počet měření)		Download (Mbps)	Upload (Mbps)	Ping (ms)	Jitter (ms)
5G	T-Mobile (80)	135,4	56,8	28,4	12,2
	O2 (80)	170,6	41,2	22,7	7,8
	Vodafone (72)	227,8	59,6	20,5	8,3
LTE-A	T-Mobile (20)	66,3	19,7	29,1	9,3
	O2 (8)	19,4	18,8	40,5	15,0
	Vodafone (8)	68,7	18,1	27,9	8,5
LTE	T-Mobile (56)	27,7	10,3	34,8	15,9
	O2 (68)	27,2	11,1	28,9	12,0
	Vodafone (68)	29,9	15,6	27,0	17,9
Celkem	T-Mobile (156)	87,8	35,4	30,8	13,2
	O2 (156)	100,3	26,9	26,3	10,0
	Vodafone (148)	128,3	37,1	23,9	12,7

Zdroj: Vlastní zpracování

Po zevrubném prozkoumání sloupce, který shromažďuje informace o průměrné rychlosti stahování, vyšlo najevo, že stěžejní náskok, jenž zde dovedl Vodafone k dílčímu prvenství, měly na svědomí převážně sítě páté generace. Zatímco v případě technologie LTE byly výsledky vskutku vyrovnané a ani u novějšího LTE-A neztrácel T-Mobile na vítěze

mnoho, značný rozdíl u 5G nakonec naklonil mísky vah na stranu nejmladšího tuzemského poskytovatele mobilních služeb. Odstup v průměru o téměř 60 Mbps od druhého a 90 Mbps od třetího místa u nejmodernějšího standardu byl tak výrazný, že znamenal ztrátu šance na jakýkoliv odlišný scénář. Za zmínku stojí také průměrný download v síti LTE-A společnosti O2, který byl více než třikrát menší ve srovnání s konkurencí. Vzhledem k pouhým osmi provedeným měřením ale neměl na konečné pořadí zásadní vliv.

Z hlediska průměrné rychlosti nahrávání si opět nejlépe vedl Vodafone, jelikož nezaostával ani v jedné ze třech hodnocených oblastí, a naopak sám v případě LTE soky výrazně předčil. Finální odstup od druhého místa, které obsadil T-Mobile i přesto činil jen 1,2 Mbps. Na chvostu se nacházel operátor O2, a to především z důvodu nekonkurenceschopného výsledku u 5G, který se oproti zbytku typicky lišil minimálně o 15 Mbps. Například přesun videa o velikosti 1 GB z mobilního telefonu do cloudového úložiště by pak zabral o zhruba 1 minutu déle než vítězi, který by ke splnění stejného úkolu potřeboval asi jen 130 sekund.

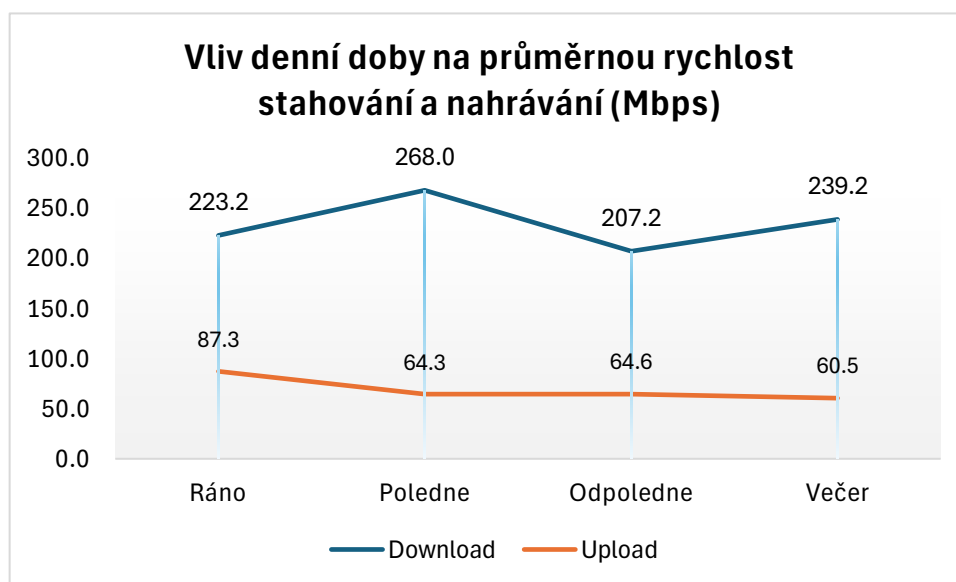
Jméno vítěze nedoznalo žádných změn ani v případě latence, kde Vodafone dominoval u každého ze sledovaných vývojových stupňů mobilních sítí. Pořadí se znovu měnilo jen na dalších místech, kde se O2 dostalo zpět na druhou pozici před T-Mobile. Odezva byla paradoxně celkově horší u LTE-A než u staršího LTE. Určitou roli ovšem i zde hrál značně odlišný počet záznamů, který způsobuje, že hrstka horších výsledků u novějšího z dvojice ihned nepatřičným způsobem vychyluje průměr. Celkově lepší výsledky autor očekával během připojení k sítím páté generace, Hodnoty menší než 15 milisekund zde totiž byly k vidění jen velmi zřídka. Na druhou stranu se podobnými výstupy prezentují také jiné uveřejněné studie a pravděpodobně se tudíž nejedná o specifikum vybraného regionu.

Stabilita připojení zjišťovaná dle parametru jitter překvapivě nekorespondovala s předchozími výsledky průměrné odezvy. Premiantem v tomto aspektu se stala společnost O2, jež konkurenci předčila zejména v oblastech, které spoléhají na LTE připojení. Ačkoliv se odlišnost mezi soupeři pohybovala v absolutních číslech pouze v řádu jednotek milisekund, v relativním vyjádření se v přepočtu jednalo klidně o 25% i vyšší náskok ve prospěch vítěze. I tak by se ovšem dalo polemizovat o tom, zda je naměřený rozdíl pro běžného uživatele vůbec rozpoznatelný. Těsné prvenství operátor O2 získal také v případě 5G sítí, čímž opanoval obě stěžejní kategorie důležité pro sestavení finálního pořadí.

Obecně lze konstatovat, že mezi jednotlivými generacemi sítí je patrná zlepšující se tendence prakticky ve všech aspektech. Posun od LTE k 5G může při mnohých scénářích užití pro zákazníka znamenat o několik úrovní lepší uživatelský zážitek. Přesto ale inzerované hodnoty parametrů připojení často neodpovídaly realitě. Příčinou mohl být pochopitelně zvolený časový úsek, který se pojí s určitým zatížením přenosové infrastruktury. Z tohoto důvodu se autor práce rozhodl provést experiment, jehož úkolem bylo posouzení vlivu denní doby na výsledky měření. Na základě těchto informací bylo následně možné stanovit, zda předchozí výstupy představují maximum pro dané kombinace operátora, technologie a lokality, nebo zda existuje potenciál k případnému zlepšení.

Vzhledem k umístění testovací lokace a přímé viditelnosti na vysílače všech operátorů, nebyly v tomto případě důkladněji vyhodnocovány parametry síly a kvality signálu, jelikož se z podstaty věci v zásadě nijak neměnily. Ačkoliv byla data snímána pro každého poskytovatele zvlášť, finální hodnocení vychází z průměrných hodnot všech záznamů pro konkrétní část dne bez ohledu na operátora. Souhrn zjištěných informací vývoji rychlosti stahování a nahrávání v čase poskytuje spojnicový graf č. 4.

Graf 4: Vliv denní doby na průměrnou rychlost stahování



Zdroj: Vlastní zpracování

Zatímco směrem od uživatele do sítě nedocházelo vyjma rána k zásadnějším výkyvům, opačně kolísala přenosová rychlost během dne mnohem více. Vysvětlením pro vyšší ranní průměrnou hodnotu parametru upload může být menší počet zařízení připojených

do sítě. Lidé se v tomto čase nejčastěji teprve přesouvají z domova do práce tudíž ještě neprobíhají například porady prostřednictvím videohovorů. Prakticky každý naopak během rána zkontroluje svůj mobilní telefon, což obnáší čtení zpráv či návštěvu sociálních sítí. Po cestě do práce si pak pouští hudbu, sleduje videa či využívá služeb online navigace s údaji o aktuálním provozu, což může být příčina druhé nejnižší naměřené hodnoty z hlediska rychlosti stahování.

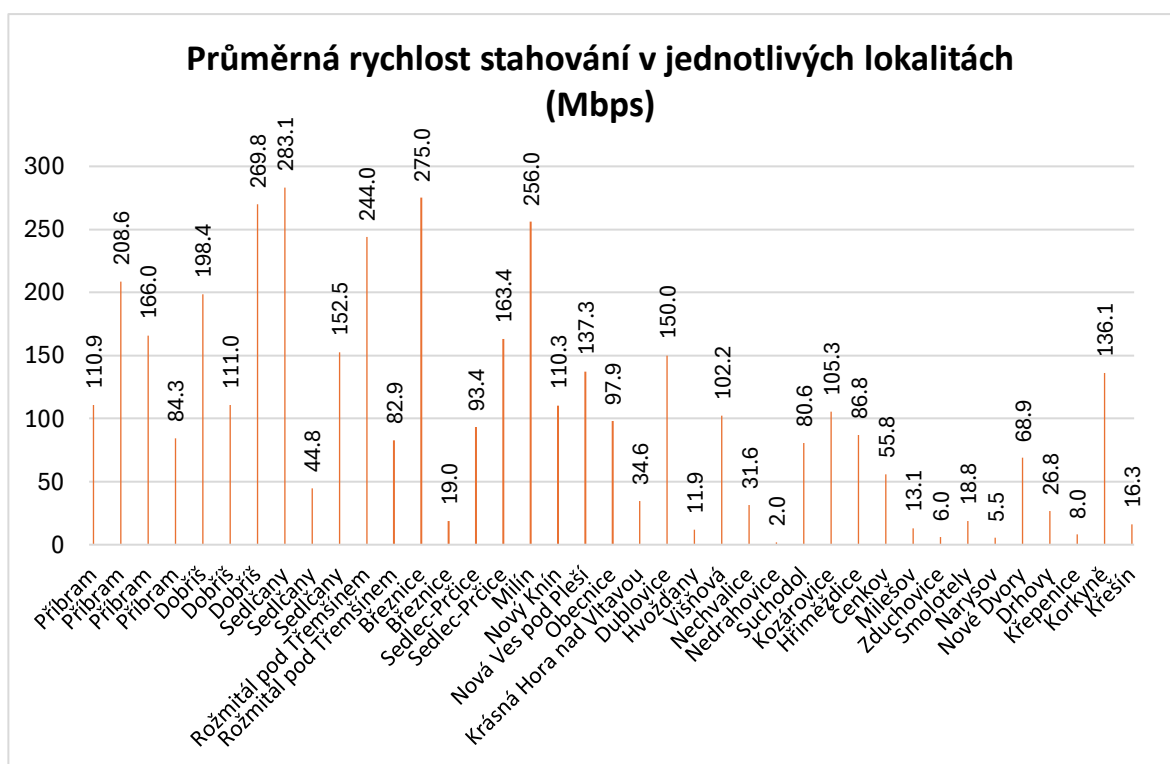
Její vrchol nastává v poledne během oběda, kdy před prací či zábavou logicky dostává přednost právě jídlo a síťový provoz tak klesá. Následuje pád až na pomyslné dno v odpoledních hodinách, kdy byla naměřena v průměru vůbec nejmenší rychlost stahování. Lidé se pomalu vrací z práce domů, což má větší dopad zejména na odlehlejší lokality s horším pokrytím, kde se přenosová kapacita snadněji vyčerpá. Do večera pak sice ještě stoupne, ale své polední maximum již nepřekoná.

Jelikož se dřívější měření soustředila především do poslední třetiny uváděného časového rozpětí, nejedná se pravděpodobně o limitní hodnoty a potenciál ke zlepšení určitě existuje. Zatímco posun k horšímu by nastat neměl a z tohoto pohledu lze výsledky považovat za jakousi jistotu, zejména v případě rychlosti stahování by neměl být problém dosáhnout ještě o 10–20 % lepších výstupů. Odlišnost parametru upload v ranních hodinách oproti zbytku dne je pak více diskutabilní, ale prostor ke zlepšení by zde měl taktéž existovat. Grafické znázornění poskytuje pouze základní představu o vývoji sledovaných veličin v čase. Pro verifikaci zjištěných vzorců chování sítě a stanovení detailnějších závěrů by bylo nutné experiment opakovat ideálně v průběhu několika dní a současně v rámci více lokalit, což nebylo vzhledem k jeho časové náročnosti možné.

Mezi sledovanými ukazateli nechyběla také latence a jitter. Rozdíly mezi záznamy z různých částí dne však byly zcela minimální. Hodnota ping se pohybovala od 20,6 do 21,6 ms. Podobně na tom byl také druhý parametr s průměrnými výsledky v rozmezí od 4,2 do 5,8 ms. Ačkoliv je horní hranice pro jitter téměř o 40 % vyšší než minimum, které bylo naměřeno v poledne, v řeči absolutních čísel se jedná o rozdíl jen 1,2 ms. V podstatě se tak ani nedá říct, že je některý z výsledků lepší než jiný, protože takto malé odlišnosti mohou vznikat i v důsledku těch nejmenších detailů, na které má vliv také samotné testovací zařízení a použitý software. Proměnlivé zatížení sítě by ale při dodržení stejných podmínek z hlediska použité technologie či vzdálenosti od vysílače nejspíše nemělo mít na odezvu takový dopad jako například na rychlost stahování.

V závěru vyhodnocování naměřených dat přišlo na řadu určení lokalit s nejlepšími, a naopak nejhoršími výsledky v několika vybraných aspektech. Jako první se autor práce zaměřil na průměrnou rychlost stahování, kterou znázorňuje graf č. 5. Jedná se o souhrnné výsledky ze všech měření na daném místě bez ohledu na operátora. Městské oblasti nemají z důvodu nedostatečného místa uvedený celý název, ale jejich pořadí odpovídá tabulce č. 2. Pro obce Kozárovice a Křešín byl průměr vypočten pouze na základě záznamů společností T-Mobile a O2, testy v síti Vodafone zde totiž nebylo možné realizovat.

Graf 5: Průměrné rychlosti stahování v jednotlivých lokalitách



Zdroj: Vlastní zpracování

První pozice obsadila podle předpokladů převážně město. Vůbec nejlepší výsledek byl zaznamenán v Sedlčanech na náměstí T. G. Masaryka, kde se průměrná rychlost stahování vyšplhala na úctyhodných 283,1 Mbps. Následovaly lokality Březnice Náměstí (275 Mbps), Dobříš Schartova (269,8), Milín (256 Mbps) a Rožmitál pod Třemšínem Náměstí (244 Mbps). Překvapením může být absence zdaleka největšího a zároveň také okresního města Příbram v předcházejícím výčtu. Jedno z navštívených míst na jejím území ale skončilo hned v závěsu za nejlepší pěticí.

Na opačné straně spektra se nachází obec Nedrahovice s průměrem 2 Mbps, která přes tento výsledek spadala spíše do středu tabulky z pohledu počtu obyvatel. Jako další v pořadí se umístily Narysov (5,5 Mbps), Zduchovice (6 Mbps), Křepenice (8,0 Mbps) a Hvožd'any (11,9 Mbps). Další výsledky už měly blíže k hranici 20 Mbps.

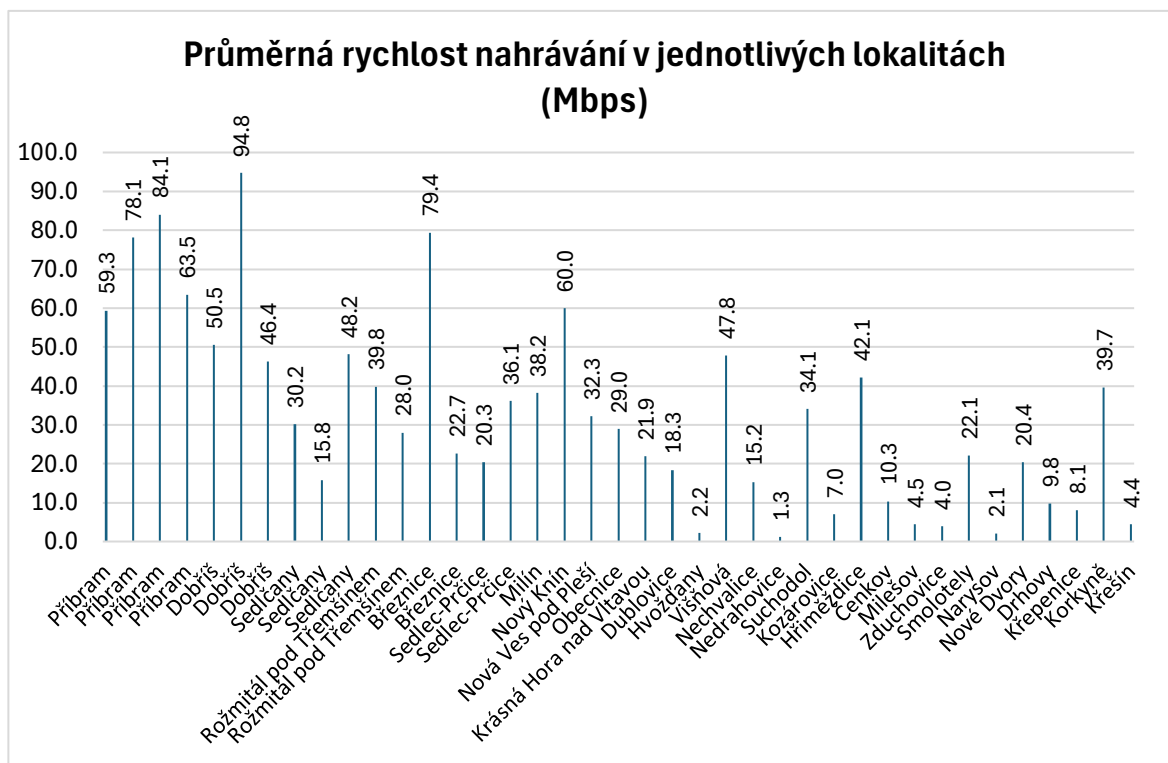
Celkový průměr rychlosti stahování ve městech činil 147 Mbps, zatímco na venkově tato hodnota spadla na 67,7 Mbps. Detailnější pohled na data jednotlivých operátorů v rámci vybraných lokalit odhalil, že zcela nejvyšší průměrné rychlosti stahování bylo dosaženo v 5G síti společnosti Vodafone v lokalitě Březnice Náměstí, která se mohla pyšnit výsledkem 454,5 Mbps. Stejný poskytovatel obsadil ještě druhé a páté místo s hodnotami 440,3 Mbps (Dobříš, Schartova) a 377,3 Mbps (Sedlec-Prčice, Vítkovo náměstí). Po jednom zástupci v elitní pětce měli také konkurenti. Třetí v pořadí se umístilo O2 s výsledkem 415,8 Mbps na náměstí J. A. Alise v Příbrami a čtvrtá pozice připadla reprezentantovi skupiny Deutsche Telekom, jemuž byla v Milíně naměřena průměrná rychlost stahování 382,3 Mbps.

Situace na protilehlé straně hovořila jednoznačně v neprospěch obce Nedrahovice, odkud pocházejí hned tři z pěti nejhorších průměrných výsledků, což znamená, že ideální pokrytí zde nemá ani jeden z trojice operátorů. Hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 1,4 Mbps v případě O2 do 2,8 Mbps v případě Vodafone. Oba dva zbývající nelichotivé údaje patří do portfolia společnosti O2, které byl naměřen průměrný download 1,7 Mbps v Drhovech a 3,2 Mbps v Narysově.

Obdobným způsobem byl následně zhodnocen také upload, o němž pojednává sloupcový graf č. 6. V první řadě tak byla identickým způsobem upřena pozornost na průměrnou rychlost nahrávání, která se určovala na základě všech dostupných záznamů pro danou lokaci. Nejlepší výsledky tentokrát bez výjimky vyprodukovala města.

Po předchozí zkušenosti navíc nečekaně hned tři z nich pocházely z Příbrami. Prvenství ovšem získala Dobříš, kde byla v ulici K Židovskému hřbitovu naměřena průměrná hodnota vyšetřovaného parametru o velikosti 94,8 Mbps. Následovaly lokality Příbram Brodská (84,1 Mbps), Březnice Náměstí (79,4 Mbps), Příbram náměstí J. A. Alise (78,1 Mbps) či Příbram Žižkova (63,5 Mbps).

Graf 6: Průměrné rychlosti nahrávání v jednotlivých lokalitách



Zdroj: Vlastní zpracování

Uživatelé by naopak zřejmě nepotěšily obce Nedrahovice (1,3 Mbps), Naryšov (2,1 Mbps), Hvoždany (2,2 Mbps), Zduchovice (4,4 Mbps) nebo Křešín (4,4 Mbps). Zatímco na jedné z prvních pěti pozic se v obou dosud sledovaných parametrech umístila jen Březnice, poslední místa měla z 80 % shodné obsazení. Celkový průměr rychlosti nahrávání ve městech činil 48,8 Mbps. Na vesnicích si zákazníci typicky museli vystačit s připojením o rychlosti 19,1 Mbps, což oproti předchozímu údaji představovalo pokles zhruba o 60 %.

Detailnější analýza se zaměřením na data jednotlivých operátorů vedla k následujícím závěrům. Nejvyšší průměrné rychlosti stahování napříč celým souborem bylo dosaženo v 5G síti společnosti T-Mobile na náměstí J. A. Alise v Příbrami, kde se ručička testovacího nástroje zastavila až na 143,3 Mbps. Stejný poskytovatel obsadil také druhé a páté místo s výsledky 135,3 Mbps (Příbram, náměstí T. G. Masaryka) a 115,3 Mbps (Březnice, Náměstí). Zbylé dvě pozice náležely operátorovi Vodafone, který v Novém Kníně na náměstí Jiřího z Poděbrad a v Dobříši v ulici K Židovskému hřbitovu zaznamenal shodných 124 Mbps.

Zatímco ve výčtu nejvyšších průměrných hodnot parametru upload vůbec nefigurovalo O2, z hlediska těch nejnižších se stalo rovnou vítězem, což způsobila situace v obci Drhovy, kde se společnost prezentovala tristním výsledkem 0,8 Mbps. Ve stejné lokalitě dopadl neslavně také T-Mobile s údajem 0,9 Mbps. Stejně jako v případě rychlosti stahování byl i nyní zjištěný stav napříč lokacemi objektivně nejhorší v Nedrahovicích, které se nacházejí jen pár kilometrů jižně od Sedlčan. Operátorům T-Mobile a Vodafone zde totiž byl shodně naměřen upload jen 1,2 Mbps. Nebýt pak Hvožd'an, kde nejmladší z trojice poskytovatelů obsadil s hodnotou 1,3 Mbps čtvrté místo, tak by se do nejhorší pětky vměstnal také nedrahovický průměr pro O2, který činil 1,4 Mbps.

Informace o průměrných rychlostech připojení byly dále podpořeny údaji o síle a kvalitě signálu z aplikace NetMonster, které odhalily místa se slabším pokrytím a případně objasnily dosažení výše uvedených výsledků. K hrubému odhadu síly přijímaného signálu posloužil parametr RSSI, který se používal spíše pro starší typy sítí. Z dnešního pohledu totiž trpí zásadní nevýhodou, kdy nebere v úvahu jen užitečný signál, ale také veškerý sekundární signál v měřeném frekvenčním rozsahu, který zahrnuje například signál sousedních základnových stanic, rušení a šum. Vysoká hodnota RSSI tak nutně nemusí předznamenávat kvalitní připojení k internetu.

Všech pět nejlepších průměrných výsledků, které byly určeny na základě veškerých záznamů pro danou lokalitu se pohybovalo okolo hranice -50 dBm, což značí vskutku vynikající sílu signálu. Pořadí bylo následující: Dobříš K Židovskému hřbitovu (-51 dBm), Březnice Náměstí (-51,7 dBm), Sedlec-Prčice Vítково náměstí (-51,7 dBm), Dobříš Mírové náměstí (-52,3 dBm) a Příbram Brodská (-53,7 dBm). Vzdálenost od vysílačů povětšinou nepřekračovala 0,5 km.

Na opačné straně žebříčku se na třech z pěti pozicí umístily již dříve zmiňované obce. Vůbec nejslabší signál -83,7 dBm byl zaregistrován ve Hvožd'anech na jihozápadě okresu. Ideální hodnoty nebyly naměřeny ani v Milešově (-81 dBm), Narysově (-80,3 dBm), Kozárovicích (-78,5) či Nedrahovicích (-77,7 dBm). Ačkoliv prostor ke zlepšení by se určitě našel, většina literatury nepovažuje obdobné výsledky za vyloženě špatné.

Mnohem lepším indikátorem síly přijímaného signálu je parametr RSRP, který přišel společně se sítěmi čtvrté generace a na rozdíl od RSSI se soustředí pouze na signál z aktuální základnové stanice bez ohledu na šum a rušení. Z těchto důvodů zároveň není možné RSSI

a RSRP vzájemně porovnávat, protože pracují s odlišnou stupnicí. I přesto byly hned čtyři z pěti nejlepších výsledků shodné. Vítězem se stala lokalita Sedlec-Prčice Vítkovo náměstí s hodnotou RSRP -82,2 dBm. V těsném závěsu se umístily Smolotely (-82,3 dBm). Další místa postupně náležela oblastem Březnice Náměstí (-83,5 dBm), Dobříš K Židovskému hřbitovu (-83,9 dBm) a Dobříš Mírové náměstí (-85 dBm).

Výčet pěti obcí s nejslabším signálem nedoznal ve srovnání s RSSI žádných změn z hlediska obsazení. Došlo pouze k úpravám pořadí. Na úplném chvostu tabulky se však i nadále nacházely Hvožd'any (-113,2 dBm). Následoval Narysov (-111,8 dBm), Nedrahovice (-111,1 dBm), Kozárovice (-110,5 dBm) a páté místo od konce patřilo Milešovu (-110,3 dBm). Výsledky značí, že se zařízení pravděpodobně nacházelo na samém okraji území, které svým signálem pokrývá daná buňka. Podobné hodnoty parametru RSRP mohou vést ke kolísání kvality připojení či dokonce ke krátkodobým výpadkům.

Měřítkem kvality přijímaného signálu ve vztahu k okolnímu rušení a šumu byl indikátor RSRQ, který vyjadřuje poměr mezi výkonem užitečného signálu a výkonem rušení. Oproti předchozím žebříčkům zde došlo k většímu množství změn, přičemž některé z nich byly nečekané. Pětici nejlepších výsledků tvořily lokality Sedlec-Prčice Vítkovo náměstí (-8,3 db), Sedlec-Prčice náměstí 7. května (-8,7 db), Dublovice (-8,7), Březnice U Blatenky (-8,8 db) a Krásná Hora nad Vltavou (-8,8 db). Zřetelná byla především absence největších měst, ve kterých na kvalitu signálu kromě vyšší koncentrace vysílačů působí také větší množství zařízení a budov, které mohou zapříčinit potenciální problémy.

Tato skutečnost se částečně projevila i ve spodních patrech tabulky s hodnocením. Čtvrté a páté místo od konce totiž opanovaly městské oblasti Sedlčany Pod Cihelným vrchem (-13,8 db) a Dobříš Mírové náměstí (-14,7). Pomyslně stupně vítězů pak obsadily lokality Nové Dvory (-14,8 db), Nedrahovice (-15 db) a Suchodol (-15,5 db). Ačkoliv se jednalo o hodnoty podprůměrného charakteru, tak nelze tvrdit, že by kvalita signálu byla vyloženě špatná. Důkazem budiž výsledky rychlosti připojení k internetu, které se vyjma Nedrahovic nedaly považovat za jakkoliv tristní.

Souhrn naměřených průměrných hodnot všech zmiňovaných parametrů napříč regionem poskytuje tabulka č. 11. Barevně vyznačeno je vždy pět nejlepších a analogicky pět nejhorších výsledků, které byly popsány výše.

Tabulka 11: Průměrné hodnoty parametrů signálu v jednotlivých lokalitách

Lokalita	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)
Příbram, náměstí TGM	-54,0	-85,3	-12,7
Příbram, náměstí J. A. Alise	-55,7	-88,6	-12,2
Příbram, Brodská (Albert)	-53,7	-88,4	-12,7
Příbram, Žižkova (Orlen)	-57,0	-91,6	-10,3
Dobříš, Mírové Náměstí (MěÚ)	-52,3	-85,0	-14,7
Dobříš, K Židovskému hřbitovu	-51,0	-83,9	-13,2
Dobříš, Schartova	-62,7	-95,8	-11,8
Sedlčany, náměstí TGM	-63,0	-95,2	-10,5
Sedlčany, Pod Cihelným vrchem	-66,3	-102,8	-13,8
Sedlčany, Zberazská	-57,0	-91,9	-11,5
Rožmitál pod Třemšínem, náměstí	-61,0	-97,8	-11,5
Rožmitál pod Třemšínem, Starý Rožmitál (zst.)	-70,3	-103,8	-11,2
Březnice, náměstí (MěÚ)	-51,7	-83,5	-12,8
Březnice, U Blatenky	-62,3	-91,0	-8,8
Sedlec-Prčice, náměstí 7. května	-60,0	-88,8	-8,7
Sedlec-Prčice, Vítkovo náměstí	-51,7	-82,2	-8,3
Milín (OÚ)	-61,0	-92,9	-9,5
Nový Knín, náměstí Jiřího z Poděbrad	-54,7	-87,8	-9,8
Nová Ves pod Pleší (parkoviště maproti OÚ)	-66,7	-97,8	-9,8
Obecnice (parkoviště COOP)	-64,0	-101,8	-12,5
Krásná Hora nad Vltavou (MěÚ)	-59,3	-86,3	-8,8
Dublovce (OÚ)	-65,3	-97,8	-8,7
Hvožd'any (OÚ)	-83,7	-113,2	-9,2
Višňová (OÚ)	-60,0	-100,2	-13,5
Nechvalice (Nechvalická hospoda, vedle OÚ)	-63,3	-90,4	-9,0
Nedrahovice (OÚ)	-77,7	-111,1	-15,0
Suchodol (parkoviště naproti OÚ)	-66,0	-105,8	-15,5
Kozárovce (parkoviště naproti OÚ)	-78,5	-110,5	-12,5
Hříměždice (restaurace U Jezírka, vedle OÚ)	-57,3	-93,8	-10,0
Čenkov (OÚ)	-68,3	-104,6	-10,7
Milešov (autobusová zastávka)	-81,0	-110,3	-9,0
Zduchovice (OÚ)	-74,3	-105,3	-10,8
Smolotely (autobusová zastávka)	-54,7	-82,3	-9,0
Narysov (OÚ)	-80,3	-111,8	-12,3
Nové Dvory (OÚ)	-65,0	-103,6	-14,8
Drhovy (OÚ)	-73,3	-106,2	-11,0
Křepeňice (OÚ)	-76,3	-105,9	-11,3
Korkyně (autobusová zastávka)	-63,3	-97,0	-9,8
Křešín (u rybníka, naproti OÚ)	-75,0	-107,8	-11,8

Zdroj: Vlastní zpracování

6 Závěr

Hlavním cílem práce bylo zhodnotit stav mobilních datových sítí ve vybraných lokalitách České republiky. Studium odborných informačních zdrojů byly položeny teoretické základy, jež poskytly potřebné znalosti o historickém vývoji, principech fungování i odlišnostech mezi jednotlivými generacemi sítí.

V praktické části byly nabyté vědomosti využity při návrhu měření, jehož účelem bylo sesbírat data o internetovém připojení pro tři největší české operátory na 39 místech ve 29 obcích napříč okresem Příbram. Prvním krokem bylo srovnání udávaného a zjištěného pokrytí signálem sítí čtvrté a páté generace. Alespoň jedna z těchto služeb byla dostupná ve všech lokalitách pro operátory T-Mobile a O2, zatímco zákazníci Vodafone se musely spokojit s dostupností pouze v 37 z celkových 39 případů, což znamenalo nepatrný pokles oproti inzerovaným údajům. Mnohem zajímavější byla ale situace při pohledu jen na 5G, kde ani jeden z poskytovatelů nedosáhl očekávaných výsledků. Zatímco u společnosti Vodafone byl rozdíl velice malý, zbylým konkurentům byla naměřena odchylka zhruba 20 procentních bodů v neprospěch skutečného stavu oproti udávanému. Ačkoliv počet pokrytých lokalit 5G signálem byl u všech tří subjektů prakticky totožný, na údaje nejmladšího českého operátora se ve srovnání se zbytkem dalo nejvíce spolehnout.

Dalším krokem byla analýza počtu spojení do jednotlivých typů sítí. Ve všech případech se jednalo o varianty LTE, LTE-A a 5G v různých poměrech. Za vítěze v tomto ohledu označit T-Mobile, který měl v součtu největší 100 spojení do sítí LTE-A a 5G. Naopak neuspokojivý výsledek podal Vodafone, jenž ve 2 lokalitách spoléhal pouze na technologii EDGE, která vůbec neumožnila provedení potřebných testů.

Jelikož novější standard automaticky neznamená záruku lepších výsledků, byla následně analyzována míra použití jednotlivých kmitočtových pásem. Jednoznačně nejčastěji bylo spojení realizováno v pásmech 800 MHz a 1800 MHz, což je vzhledem k většímu počtu venkovských oblastí pochopitelné. Překvapivá byla úplná absence pásma 3500 MHz. Spojitost s použitými frekvencemi má většinou vzdálenost k vysílači, která byla v celkovém srovnání i s ohledem na 5G sítě v průměru nejmenší u společnosti Vodafone.

Stěžejním prvkem praktické části bylo stanovení průměrů a mediánů přenosových rychlostí směrem k uživateli i od něj a dále pak latence a jejího kolísání v čase, jež vyjadřuje stabilitu připojení. Všechny výpočty potvrdily že v prvních třech parametrech dominoval

operátor Vodafone. Nejlepší stabilitou sítě se prezentoval poskytovatel O2. Některé rozdíly byly opravdu značné, například průměrná rychlost stahování u vítěze byla o 46 % lepší než dosažený výsledek společnosti T-Mobile. Detailní pohled na data za jednotlivé technologie odhalil, že náskok operátora Vodafone zapříčinily hlavně 5G sítě.

Monitoring vytížení sítě v průběhu dne ukázal, že zvolením jiného časového úseku pro měření by se dalo dosáhnout na hodnoty o 10 % až 20 % lepší, zatímco k výraznému už poklesu by docházet nemělo. V poslední části byly určeny lokality s nejlepšími a nejhoršími výsledky, které byly obohaceny o data týkající se síly a kvality signálu. Na základě těchto údajů vybráno několik lokalit, které by si zasloužily ze strany operátorů lepší pokrytí pro dosažení kvalitnějšího uživatelského zážitku. Do tohoto seznamu spadaly zejména obce Hvozdňany, Nedrahovice, Kozárovice, Milešov a Narysov. Na druhé straně žebříčku se nacházely především městské oblasti. Ani tak ovšem nelze konstatovat, že by větší počet obyvatel automaticky znamenal lepší výsledky.

Obecně je možné tvrdit, že nejhorší pokrytí ve zvoleném regionu má společnost Vodafone, jejíž služby nebyly ve dvou případech vůbec dostupné. V ostatních aspektech ale tento operátor často dominoval a jeho mapa pokrytí poskytovala nejpřesnější data ve srovnání s realitou.

Práce nabízí do budoucna značné možnosti rozšíření. Jednou z nich je například navýšení počtu měřicích bodů ve stejné oblasti, nebo analýza zcela jiného regionu. Pro zajištění ještě větší relevance testů by bylo vhodné experiment opakovat několikrát během dne. Zajímavé výsledky by mohlo přinést také zapojení většího počtu zařízení různých výrobců s odlišnými technickými specifikacemi.

7 Seznam použitých zdrojů

- ADSL.CZ, 2015. *Frekvenční pásmo u LTE sítě*. online. In: Adsl.cz. Dostupné z: <https://www.adsl.cz/clanky/frekvencni-pasmo-u-lte-siti>. [cit. 2024-01-31].
- BEČVÁŘ, Zdeněk; MACH, Pavel a PRAVDA, Ivan, 2013. *Mobilní síť*. online. Praha: ČVUT, Fakulta elektrotechnická. ISBN 978-80-01-05305-8. [cit. 2024-02-05].
- BÍLÝ, Vladimír, 2004. *CDMA versus EDGE aneb Hladina datových toků stoupá*. online. In: Idnes.cz. Dostupné z: https://www.idnes.cz/mobil/tech-trendy/cdma-versus-edge-aneb-hladina-datovych-toku-stoupa.A040824_5282297_mob_tech. [cit. 2024-02-22].
- CESNET, 2023. *30 let sítě CESNET rok po roku*. online. In: Cesnet.cz. Dostupné z: <https://www.cesnet.cz/sdruzeni/zpravy/tiskove-zpravy/30-let-site-cesnet-rok-po-roku/>. [cit. 2023-08-29].
- CESNET, 2023. *Topologie sítě CESNET3*. online. In: Cesnet.cz. Dostupné z: <https://www.cesnet.cz/sluzby/pripojeni/topologie/>. [cit. 2023-08-29].
- CZ.NIC, 2017. *Jak na Internet: Historie Internetu*. online. In: Jaknainternet.cz. CZ.NIC. Dostupné z: <https://www.jaknainternet.cz/page/1205/historie-internetu/>. [cit. 2023-08-19].
- FREQUENCYCHECK, 2024. *GSM 1900 (PCS)*. online. In: Frequencycheck.com. Dostupné z: <https://www.frequencycheck.com/bands/gsm-gprs-edge-band-14-pcs-1900>. [cit. 2024-02-12].
- GSMA, 2024. *Our technology: The GSM family of technologies*. online. In: Gsma.com. Dostupné z: <https://www.gsma.com/aboutus/who-we-are/our-technology/>. [cit. 2024-02-04].
- HOMOLOVÁ, Marie, 2020. *STO OBJEVŮ: Za otce telefonu je považován Bell. Volalo se ale dříve*. online. In: Idnes.cz. Mafra. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/veda/sto-objevu-sveta-souboj-o-patent-telefon-technet-bell-meucci-americky-kongres.A200610_130201_veda_taj. [cit. 2023-08-18].
- LU, Xiao; WANG, Ping; NIYATO, Dusit; KIM, Dong a HAN, Zhu, 2016. *Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications*. online. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. roč. 18, č. 2. ISSN 1553877X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2499783>. [cit. 2021-06-23].

- MACEK, Jiří, 2012. *Jak se psala historie mobilních telefonů ve světě i u nás*. online. In: Cnews.cz. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/clanky/jak-se-psala-historie-mobilnich-telefonu-ve-svete-i-u-nas/>. [cit. 2024-01-31].
- MADRIGAL, Alexis, 2011. The 1947 Paper That First Described a Cell-Phone Network. online. *Theatlantic.com*. ISSN 2151-9463. Dostupné z: <https://www.theatlantic.com/technology/archive/2011/09/the-1947-paper-that-first-described-a-cell-phone-network/245222/>. [cit. 2023-08-18].
- MAREK, Jan, 2021. *Před 25 lety se v Česku začaly masově šířit mobily. Co uměly a kolik stály?*. online. In: Seznamzpravy.cz. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/pred-25-lety-se-v-cesku-zacaly-masove-sirit-mobily-co-umely-a-kolik-staly-168707>. [cit. 2024-02-04].
- MATURA, Jan a LODL, Jan, 2010. *Předchůdce Vodafonu, operátor Oskar, dnes slaví 10 let*. online. In: Idnes.cz. Dostupné z: https://www.idnes.cz/mobil/mobilni-operatori/predchudce-vodafonu-operator-oskar-dnes-slavi-10-let.A100301_021830_mob_operatori_jm. [cit. 2024-02-21].
- MISHRA, Ajay R., 2018. *Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G:: Evolution To 5G*. online. 2nd ed. Wiley. ISBN 9781119331704. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/czup/detail.action?docID=210581>. [cit. 2024-02-09].
- NIX.CZ. *Neutral Internet eXchange nejen České republiky*. online. In: Nix.cz. Dostupné z: <https://nix.cz/about/>. [cit. 2023-09-11].
- O'REGAN, Gerard, 2018. *World of Computing: A Primer Companion for the Digital Age*. online. Springer. ISBN 978-3-319-75844-2. [cit. 2023-08-19].
- PETERKA, Jiří, 1994. *Z historie sdělovací techniky*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a94/a404c501.php3>. [cit. 2023-08-18].
- PETERKA, Jiří, 1995. *Na počátku byl ARPANET...* online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a95/a504c502.php3>. [cit. 2023-08-19].
- PETERKA, Jiří, 1995. *Internet u nás*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a95/a504c504.php3>. [cit. 2023-08-22].

- PETERKA, Jiří, 1998. *Komeracionalizace Internetu*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a95/a504c502.php3>. [cit. 2023-08-20].
- PETERKA, Jiří, 2000. *Data v mobilních sítích: Celulární (buňkový) princip*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a008s200/a008s201.php3>. [cit. 2024-02-07].
- PETERKA, Jiří, 2000. *Data v mobilních sítích: Sdílené využití frekvencí - časový multiplex*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a008s200/a008s202.php3>. [cit. 2024-02-12].
- PETERKA, Jiří, 2000. *Data v mobilních sítích: CSD - Circuit Switched Data*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/a008s200/a008s204.php3>. [cit. 2024-02-21].
- PETERKA, Jiří, 2001. *Mobilní data: HSCSD, GPRS*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/b01/b1100014.php3>. [cit. 2024-02-21].
- PETERKA, Jiří, 2006. *NIX.CZ je osmý největší v Evropě*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/b06/b1214001.php3>. [cit. 2023-09-11].
- PETERKA, Jiří, 2007. *Rychlá, ale přesto mobilní data*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/b07/b1200001.php3>. [cit. 2024-02-21].
- PETERKA, Jiří, 2014. *Přednáška na MFF UK Počítačové sítě, verze 4.0: Základní pojmy a paradigmatu světa počítačových sítí*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/l226/nahled.php3>. [cit. 2023-08-19].
- PETERKA, Jiří, 2014. *Přednáška na MFF UK Počítačové sítě, verze 4.0: Mobilní komunikace*. online. In: Earchiv.cz. Dostupné z: <https://www.earchiv.cz/l226/nahled.php3?l=21>. [cit. 2024-01-28].
- PUŽMANOVÁ, Rita, 2004. *Širokopásmový Internet: přístupové a domácí sítě*. Brno: Computer Press. ISBN 80-251-0139-8.
- RAMBOUSEK, Adam, 2003. *Historie mobilní komunikace*. online. In: Fi.muni.cz. Dostupné z: https://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2003/xrambous_index.htm. [cit. 2023-08-18].

- SATRAPA, Pavel, 2016. *CESNET má 20 let: historie české akademické sítě*. online. In: Root.cz. Internet Info. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/cesnet-ma-20-let-historie-ceske-akademicke-site/>. [cit. 2023-08-29].
- SAUTER, Martin, 2021. *From GSM to LTE-Advanced Pro And 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. online. 4th. Newark: Wiley. ISBN 9781119714705. Dostupné z: databáze Proquest. [cit. 2023-06-29].
- SLADKÝ, Jan, 1999. *Stručná historie GSM*. online. In: Idnes.cz. Dostupné z: https://www.idnes.cz/mobil/mobilni-operatori/strucna-historie-gsm.A_990813_0001523_mob_operatori. [cit. 2024-02-04].
- SPĚŠNÝ, Jan, 2022. Internet v České republice. *Computer: Žijte digitálním světem*. roč. 29, č. 42022, s. 44–45. ISSN 1210-8790.
- VÁCLAVÍK, Lukáš, 2017. *Před 25 lety se Československo připojilo k Internetu. Připomeňte si hlavní milníky*. online. In: Cnews.cz. Internet Info. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/clanky/pred-25-lety-se-ceskoslovensko-pripojilo-k-internetu-pripomente-si-hlavni-milniky/>. [cit. 2023-08-29].
- VYLEŤAL, Martin, 2013. *NIX.CZ má novou konkurenci, majitel SuperHostingu spustil peeringové centrum*. online. In: Lupa.cz. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/nix-cz-ma-novou-konkurenci-majitel-superhostingu-spustil-peeringove-centrum/>. [cit. 2023-09-11].
- ZANDL, Patrick, 2003. *Historie českého Internetu (7.)*. online. In: Lupa.cz. Internet Info. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/historie-ceskeho-internetu-7/>. [cit. 2023-08-22].
- ZANDL, Patrick, 2003. *Historie českého Internetu (8.)*. online. In: Lupa.cz. Internet Info. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/historie-ceskeho-internetu-8/>. [cit. 2023-08-22].
- ZANDL, Patrick, 2003. *Historie českého Internetu III*. online. In: Lupa.cz. Internet Info. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/historie-ceskeho-internetu-iii/>. [cit. 2023-08-29].
- ZANDL, Patrick, 2004. *Kterak Eurotel k NMT licenci přišel*. online. In: Idnes.cz. Dostupné z: https://www.idnes.cz/mobil/tech-trendy/kterak-eurotel-k-nmt-licenci-prisel.A040803_5265782_mob_ceny. [cit. 2024-01-31].

SULTAN, Alain. *5G System Overview*. Online. 3GPP.org. 2022. Dostupné z: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview?>. [cit. 2024-03-31].

MICHLOVSKÝ, Jakub. *Zlomový rok 2021, Computer: Žijte digitálním světem*. Czech News Center, 1994-. ISSN 1210-8790. [cit. 2024-03-31].