

**Univerzita Hradec Králové**  
**Fakulta informatiky a managementu**  
**Katedra informatiky a kvantitativních metod**

Analýza vlivu reálného přenosového prostředí  
na šíření signálu Wi-Fi  
Bakalářská práce

Autor: Jan Horáček

Studijní obor: Aplikovaná Informatika

Vedoucí práce: Mgr. Josef Horálek, Ph.D.

Hradec Králové

## Prohlášení

Prohlašuji, že uvedenou bakalářskou práci jsem zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.

Podpis:

V Hradci Králové 20.4.2019

Jan Horáček

## Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce panu Mgr. Josefu Horálkovi PhD. za odborné vedení a cenné podněty a připomínky. Můj dík patří i všem, kteří mi poskytovali v průběhu zpracování mé bakalářské práce svou odbornou i lidskou pomoc.

Jan Horáček

## Anotace

Tato práce se věnuje Wi-Fi technologii, jejímž úkolem je přenos dat. Popisuje dva z nejpoužívanějších standardů, a to IEEE 802,11n a 802.11ac. Dále popisuje standard IEEE 802.11ad, který je odlišný, vzhledem k tomu, že je určen především pro průmyslové oblasti. Práce obsahuje teoretický popis technologií a jejich částí. Dále je zpracován praktický test rychlosti v závislosti na prostředí a typu dat, které jsou přenášeny.

## Anotation

Title: The analysis of the influence of transmission areas on the Wi-Fi spreading

This thesis deals with Wi-Fi technology, which task is the data transfer. It describes two of the most widely used standards, IEEE 802.11n and 802.11ac. It describes IEEE 802.11ad standard too, which is different since it is intended primarily for industrial areas. The thesis contains a theoretical description of technologies and their parts. In addition, a practical speed test is performed, depending on the environment and the type of data being transmitted.

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Vývoj bezdrátových sítí .....	2
3	Standardy rodiny 802.11 .....	3
4	Legislativa provozu v ČR.....	7
5	Architektura bezdrátových sítí .....	8
6	Wi-Fi kanály.....	10
6.1	Kanály pásma 2,4GHz.....	10
6.2	Kanály pásma 5GHz.....	11
7	Přenosové mechanismy.....	14
8	Šíření elektromagnetický vln .....	16
9	Standard IEEE 802.11n.....	17
9.1	MIMO/SU-MIMO.....	18
9.2	Hardware .....	20
10	Standard IEEE 802.11ac .....	22
10.1	MIMO / MU MIMO.....	23
10.2	Hardware .....	23
11	Standard IEEE 802.11 ad .....	25
12	Měření přenosu dat pomocí technologie Wi-Fi 802.11ac .....	26
12.1	Měření síly signálu.....	27
12.2	Měření datového toku.....	32
13	Vyhodnocení výsledků.....	37
14	Závěr .....	42
15	Zkratky .....	43
16	Seznam použité literatury.....	44
16.1	Dokumenty volně dostupné na internetu.....	44
16.2	Odborné články .....	46
17	Seznam obrázků, tabulek a grafů .....	47
18	Přílohy .....	48
18.1	Příloha č.1 Výsledky z programu VisiWave pro 20MHz 5GHz pásma.....	48
18.2	Příloha č.2 Výsledky z programu VisiWave pro 40MHz 5GHz pásma.....	52
18.3	Příloha č.3 Výsledky z programu VisiWave pro 80MHz 5GHz pásma.....	57

# 1 Úvod

Bezdrátový přenos dat a informací je dnes nepostradatelnou technologií, kterou využívá každý z nás. Obklopuje nás a je všudypřítomná. Počet zařízení pro bezdrátový přenos dat neustále stoupá, nároky na ně se neustále zvyšují. Díky těmto skutečnostem dochází často k mísení vysílacích signálů a vzájemnému rušení vysílačů.

K běžnému bezdrátovému přenosu dat využíváme technologii Wi-Fi. Wi-Fi zahrnuje různé standardy, které se postupně zdokonalují a přizpůsobují se rostoucím požadavkům ze strany uživatelů.

V této práci budou zkoumány nejnovější technologie /standardy/, které jsou v současné době dostupné na trhu. Jedná se o standardy 802.11n, 802.11ac a 802.11ad. Poslední ze zmíněných standardů není primárně určen pro „domácí využití“, ale především pro využití průmyslové.

Hlavním cílem této bakalářské práce je vyhodnotit rychlost přenosu dat ve vztahu k různým typům překážek a současně pro různé typy vysílaných dat. Při výběru překážek a typů vysílaných dat bude hlavní snahou simulovat běžné domácí či kancelářské prostředí a datový provoz. Po získání základních charakteristik šíření určitého typu dat bezdrátovým přenosem ve vybraném prostředí budou tyto porovnávány s tabulkovými hodnotami. Současně se měřením ověří vhodnost využití 5GHz nebo 2,4GHz vysílacího pásma pro vybraný typ překážek. Standard 802.11ac bude hlavní prioritou pro měření.

## 2 Vývoj bezdrátových sítí

Dříve, než došlo k zavedení normy IEEE 802.11, byl rozmach bezdrátových sítí omezen tak, že výrobci jednotlivých Wi-Fi zařízení aplikovali při jejich výrobě pouze vlastní proprietární normy. Z tohoto důvodu nebylo možné pro bezdrátový přenos dat kombinovat zařízení od různých výrobců (ŠIMEK a PETROVIČ, 2013). V roce 1990 začala organizace IEEE (Institute of Electronics Engineers) pracovat na normě, která by umožnila vzájemnou spolupráci zařízení od různých výrobců. (ŠIMEK a PETROVIČ, 2013, s.1). Díky této snaze došlo v červenci roku 1997 k vzniku normy IEEE 802.11. Norma v této době využívala bezlicenčního pásma 2,4GHz v rozsahu od 2,4 do 2,4835 GHz. (Brisbin, 2002)

### 3 Standardy rodiny 802.11

Wi-Fi (Wireless Fidelity) je komerční název bezdrátové technologie, která se využívá k náhradě kabelových počítačových sítí nebo zvětšení jejich dosahu. Pro přenos dat se využívá bezlicenčních nekoordinovaných pásem 2,4GHz a 5GHz (viz kapitola 4), které jsou volně dostupné téměř v každé zemi. Wi-Fi technologie využívá standardy rodiny IEEE 802.11.

Tento standard určuje specifikace pro implementaci spojové (linkové) vrstvy (Data Link Layer), respektive její sub vrstvy MAC a fyzické vrstvy na WLAN pro počítačovou /datovou/ komunikaci v pásmu 900MHz, a 2,4GHz, 3,6GHz, 5 GHz a 60GHz.

DLC spojová vrstva	LLC podvrstva řízení logického spoje	
	MAC podvrstva řízení přístupu k médiu	MAC management
PHY fyzická vrstva	PLCP	PHY management
	PMD	

Obrázek 1 Vrstvový model sítě IEEE 802.11 převzato z Šimeček Petrovič 2013

Tyto standardy rodiny IEEE 802.11 patří mezi nejvíce rozšířené standardy bezdrátových počítačových sítí využívaných v domácím prostředí nebo kancelářských sítích. Umožňují tak komunikaci mezi počítači, tiskárnami, telefony atp.

Velkou výhodou zařízení, která pracují v uvedených pásmech, je jejich poměrně nízká cena. Respektive zařízení pracující v pásmu 2.4GHz jsou z větší části levnější než zařízení pracující v pásmu 5GHz.

Hlavní nevýhodou těchto sítí je velmi často jejich špatné zabezpečení a neznalost uživatelů, kteří si neuvědomují, že se Wi-Fi signál šíří i napříč pevnými překážkami, jako je například zeď.



### **IEEE 802.11a**

Norma 802.11a byla schválena v roce 1999 po té, kdy došlo k uvolnění 5 GHz pásma pro volné používání. Jelikož využívá vyšších frekvencí, je dosahováno větších přenosových rychlostí, a to až 54Mbit/s v ideálních podmínkách. Na rozdíl od 802.11b využívá na fyzické vrstvě technologie OFDM (Brisbin 2002). Tato technologie bude popsána dále v kapitole č. 7.

### **IEEE 802.11b**

Jedná se o normu, která byla vydána v roce 1999, aby nahradila původní normu 802.11. Hlavním problémem starší normy byla velmi nízká přenosová rychlost, která dosahovala maximálně 2Mbit/s. Norma 802.11b dosahovala přenosovou rychlost až 11Mbit/s (Brisbin 2002). Je zde využíván nový systém kódování CCK (Complementary Code Keying) na fyzické vrstvě. Toto má za následek, že zařízení může měnit svoji rychlost v závislosti na momentální síle a kvalitě signálu. Norma pracuje na frekvenci 2,4 GHz a nabízí 4 rychlosti přenosu 11Mbit/s, 5,5Mbit/s, 2Mbit/s, 1Mbit/s (ŠIMEK a PETROVIČ 2013).

### **IEEE 802.11g**

Standard 802.11g vznikl v roce 2003 a zdokonaluje starší verzi protokolu 802.11b. Stejně jako jeho zmíněný předchůdce pracuje na frekvenčním pásmu 2,4GHz, ale přenosová rychlost z původních 11Mbit/s vzrostla až na 54Mbit/s (Poole nedatováno), čímž se dostala na úroveň rychlosti protokolu 802.11a v 5GHz pásmu.

Původní technologie DSSS byla nahrazena OFDM, která je zpětně kompatibilní. Přístup k médiu probíhá pomocí mechanismů CSMA/CA s RTS/CTS. U této normy mohou souběžně pracovat klienti normy 802.11g a 802.11b, avšak při souběžné práci dochází ke značným poklesům přenosových rychlostí. Mechanismus RTS/CTS je hlavní příčinou tohoto zpomalení. Mechanismus se používá na odhalení skrytého uzlu a zajišťuje zabránění kolizí mezi klienty rozdílných protokolů.

### **IEEE 802.11n**

Tento standard byl průlomový. Použitím MIMO (multiple input multiple output) technologie, která využívá vícero vysílacích a přijímacích antén, bylo dosaženo zvýšení rychlosti přenosu dat. Standard umožňuje využívat současně pásmo 2,4GHz i 5GHz. Touto normou byla zvětšena šířka kanálů, a to až na 40MHz, tudíž lze použít 22MHz širší, respektive 20MHz nebo 40MHz – viz kapitola 6. Nebývá pravidlem, že zařízení využívající tento standard pracují v obou pásmech současně. V pásmu 2,4GHz pracují ale vždy. U této normy se rychlost datového toku pohybuje od 54Mbit/s do 600 Mbit/s.

### **IEEE 802.11y**

Tento standard vznikl jako pozměňovací návrh na IEEE standardy 802.11-2007. Tento návrh umožnil vysokofrekvenční přenos dat pomocí protokolu 802.11a, avšak v pásmu 3,6GHz, respektive 3,65GHz až 3,7GHz ve Spojených Státech Amerických.

### **IEEE 802.11ac**

Standard bezdrátové komunikace pracující na frekvenčním pásmu 5GHz. Jedná se o jeden z nejnovějších standardů, který byl schválen v roce 2014. Poskytuje vysokou propustnost dat. Teoretická propustnost mezi více stanicemi má být až 1Gbit/s a propustnost jedné linky alespoň 500Mbit/s. Původně vychází z IEEE 802.11a. Avšak v porovnání s verzí, ze které vychází, nabízí širší kanály 80 nebo 160 MHz namísto 40 MHz.

V porovnání s 2,4GHz pásmem je vhodné zmínit, že díky vyšší frekvenci nedokáže signál v pásmu 5GHz proniknout přes stěny nebo jiné překážky stejně jako signál s nižší frekvencí.

### **IEEE 802.11ad**

V roce 2009 vzniklo obchodní sdružení WiGig (Wireless Gigabit Alliance), jehož cílem byla podpora standardu 802.11ad. Označení WiGig se používá pouze ve spojení se standardem 802.11ad. Tento standard využívá pásmo 60 GHz, což mu umožňuje dosažení rychlosti přenosu dat až 7Gbit/s. Vysoké frekvence tohoto standardu omezují jeho použití na místnosti o velikosti několika metrů. Signál o frekvenci 60 GHz obvykle nepronikne stěnami a jeho dosah je v průměru přibližně 7 metrů. Pro delší dosah je nutné využít IEEE 802.11ac či jiné normy, ovšem za cenu nižší přenosové rychlosti.

### **IEEE 802.11ax**

Standard známý také jako WiFi 6 je stále ve fázích vývoje, ale je považován za nástupce normy 802.11ac. Cílem tohoto standardu je vyřešení problému interferencí mezi různými přístupovými body, ke kterým dochází v hustě pokrytých oblastech a v důsledku toho i ke zpomalení rychlosti přenosu datových sítí. Tato norma by měla být zveřejněna v prosinci roku 2019 na zasedání komise RevCom IEEE.

### **IEEE 802.11ah**

Jedná se o nový Wi-Fi standard publikovaný v roce 2017, který pracuje v rozmezí 755 až 928 MHz. Velikost frekvence, na které tento protokol pracuje, je daná regionem, v němž se právě nacházíme. V Evropě se pro tento standard využívá frekvence 863 až 868MHz. Tento protokol vznikl jako podpora pro internet věcí (IoT) a rozšíření Wi-Fi. Vzhledem k malému frekvenčnímu rozsahu tohoto pásma je šířka kanálů 1MHz nebo 2MHz. Maximální rychlost přenosu dat je 347 Mbit/s.

### **IEEE 802.11aj**

Tento protokol upravuje původní protokol 802.11ad, který využívá 60 GHz pásma. Upravená verze byla vyvinuta především kvůli nátlaku čínského trhu. Využívá pásmo 45 GHz.

## 4 Legislativa provozu v ČR

V České Republice je dovoleno využívat bez licenčních poplatků tzv. ISM (industrial, scientific and medical) pásma. Pro bezdrátový přenos dat se využívají pásma 2,4GHz a 5GHz (2,4GHz až 2,48GHz a 5,1GHz až 5,8GHz).

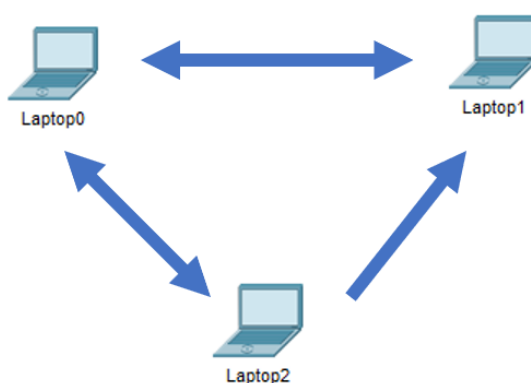
Podmínky pro jejich využití jsou uvedené ve všeobecném oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4GHz až 66GHz, vydaném Českým telekomunikačním úřadem dne 29.zář 2010 pod Čj. 98 973/2010-613 a VO-R/10/11.2016-13 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu, která se nacházejí v pásmech od 6kHz do 246GHz, vydaném Českým telekomunikačním úřadem dne 22. listopadu pod Čj. ČTÚ-90 291/2016-613 Maximální povolený vyzářený výkon vysílacího řetězce (vysílač + anténní svod + anténa) je maximálně 100mW(20dBm). Níže uvedené tabulky shrnují výše zmíněné vyhlášky pro pásma 2,4GHz až 2,48GHz a 5,1GHz až 5,8GHz a pro 57GHz až 66GHz.

Technické parametry stanic				
Kmitočtové pásmo	Vyzářený výkon	Maximální hustota.	spektrální	Další podmínky
2,4–2,4835 GHz	100 mW	10 mW/1 MHz		systemy s technikou DSSS5 nebo OFDM
		100 mW/100 kHz		systemy s technikou FHSS
5,15–5,25 GHz	200 mW	10 mW/MHz střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz)		pouze pro použití uvnitř budovy
5,25–5,35 GHz	200 mW	10 mW/MHz střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz)		pouze pro použití uvnitř budovy
5,47–5,725 GHz	1 W	50 mW/MHz střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz)		
57–66 GHz	40 dBm	13 dBm/MHz střední spektrální hustota)		Stálé venkovní instalace jsou vyloučeny

Tabulka 1 Technické parametry stanic převzato z VO-R/12/09.2010-12

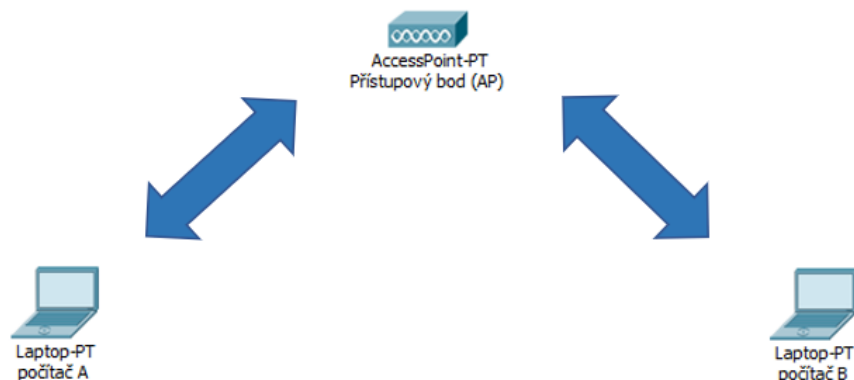
## 5 Architektura bezdrátových sítí

Z větší části základ architektury bezdrátových sítí tvoří AP (Access Point). AP je prostředník, přes kterého probíhá veškerá komunikace vzduchem. Dvě stanice spolu nikdy nekomunikují přímo, ale pouze prostřednictvím AP (Zandl 2003). U sítí ad-hoc (obdoba kabelových peer-to-peer) toto pravidlo neplatí, jelikož se v těchto případech využívá technologie přímého propojení dvou stanic, a tudíž nepotřebují další prvek ke vzájemné komunikaci.



Obrázek 2 Ad-hoc síť

Obrázek 2 nám znázorňuje ad-hoc síť, která nevyužívá ke komunikaci žádné AP. Stanice spolu komunikují napřímo na bázi peer to peer, která se využívá u kabelových sítí. Tento typ sítí není často využíván, jelikož stanice, které spolu mají komunikovat, musí být v dosahu pro každou z těchto stanic, což vytváří závislosti jedné stanice na druhé. Konfigurace těchto sítí může být náročnější nežli u infrastrukturních, které využívají AP. Proto se tato síť využívá především pro nouzová řešení nebo dočasná řešení.



*Obrázek 3 Infrastrukturní síť*

Infrastrukturní síť se liší od ad-hoc sítí využívají pro komunikaci mezi jednotlivými stanicemi přístupové body (AP), které zprostředkovávají veškerou komunikaci. Tedy, pokud chce počítač A komunikovat s počítačem B, nedojde k přímému spojení těchto počítačů, viz Obrázek 3. Tento typ sítě odstraňuje závislosti mezi jednotlivými stanicemi a správa takovéto sítě je značně jednodušší a flexibilnější.

Standardy IEEE 802.11x jsou definované na prvních dvou vrstvách referenčního modelu ISO/OSI – fyzické vrstvě a spojové vrstvě. První fyzickou vrstvou (physical layer) – dále jen PHY – tvoří dvě podvrstvy:

- PMD (Physical Medium Dependent) – podvrstva PMD zajišťuje přenos dat mezi vysílačem a přijímačem. Přenos probíhá předáním rámců PLCP podvrstvě PMD, která vyšle signál přijímacímu mediu, kde jsou data pomocí PMD předána podvrstvě PLCP.
- PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) – podvrstva PLCP obsahuje informace, které specifikují, jaký přenosový mechanismus a modulace byla použita. Přikládáním této informace docílíme nezávislosti přenášeného datového rámce na typu fyzické vrstvy.

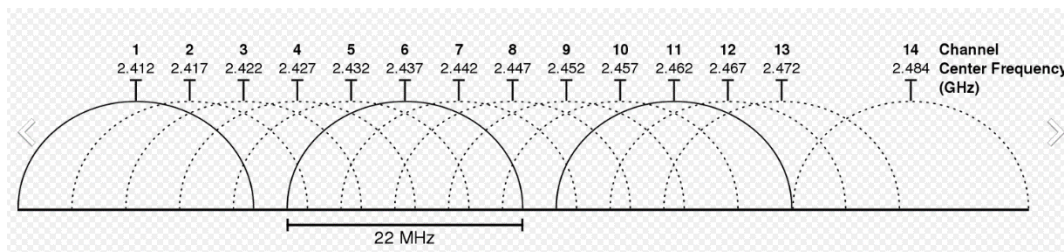
## 6 Wi-Fi kanály

Pro přenos dat využívá technologie Wi-Fi tzv. ISM pásma pro rádiové vysílání. Jsou to pásma volná, nelicencovaná. Tento fakt umožňuje uživatelům přístup k rádiovému signálu bez nutnosti omezení či regulace (Poole nedatováno). Značnou nevýhodou je sdílení tohoto spektra s dalšími uživateli, proto musí být systém přenosu odolný vůči rušení.

Pro přenos dat pomocí Wi-Fi technologie se využívá bezlicenčních nekoordinovaných pásem 2,4GHz a 5GHz, která jsou volně dostupná téměř v každé zemi. Každé pásmo se dělí do kanálů. V různých zemích jsou uvolněné pro provoz různé kanály, které reguluje telekomunikační úřad v této zemi. Například pro pásmo 2,4GHz se v Evropě jako ve většině zemí používá kanál 1-13. V Severní Americe je za normálních podmínek povoleno používat pouze kanály 1-11. Kanály 12,13 jsou povoleny pouze za předpokladu nízkého napájení.

### 6.1 Kanály pásma 2,4GHz

Pásmo 2,4GHz je rozdělené na 14 různých kanálů definovaných Wi-Fi normou 802.11. Kanály jsou vzájemně posunuté o 5MHz. Výjimkou jsou 13. a 14. kanál, ty jsou posunuté o 12MHz. Šířka kanálů dle standardu 802.11 je 22MHz (Poole nedatováno).



Obrázek 4 Kanály v pásmu 2,4GHz (převzato z *WIRELESS NETWORKING IN THE DEVELOPING WORLD* 2007)

Šířka kanálů a jejich vzájemný posun znamená (viz Obrázek 4), že se sousední kanály navzájem překrývají. Pouze kanály 1-6-11 (14) se navzájem nepřekrývají. Jak bylo zmíněno, norma 802.11n zvyšuje šířku kanálů na 40MHz (Gast 2012). Tato vyšší frekvence se používá pro zvýšení propustnosti dat, avšak zredukuje se počet dostupných kanálů na dva, jelikož dostupná šíře je pouze mezi 2400 až 2490MHz.

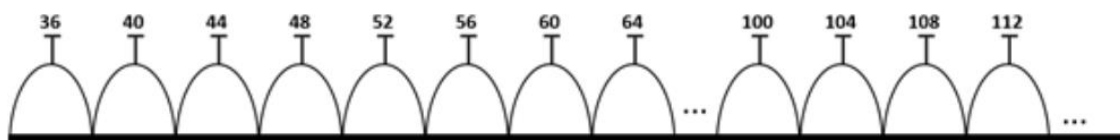
Minimální frekvence MHz	Maximální frekvence MHz	Shrnutí
2400	2500	Toto spektrum je nejvíce rozšířeno u Wi-Fi Nabízí širší kanálů 20 nebo 40 MHz Maximálně 3 nepřekrývající se kanály
5725	5875	Poskytuje oproti 2,4GHz větší širší pásma a vyšší frekvenci. Menší dosah než 2,4GHz

Tabulka 2 Porovnání pásma 2,4GHz a 5GHz

## 6.2 Kanály pásma 5GHz

Vzhledem k tomu, že pásmo o frekvenci 2,4GHz se stalo přeplněným, začalo se využívat pásmo 5GHz. Tento krok přinesl mnoho výhod. Toto pásmo není totiž využíváno tak masivně ostatními přístroji.

5 GHz pásmo je rozděleno do 5 MHz kanálů. Avšak na rozdíl od 2,4GHz pásma, aby nedocházelo k překryvům, je používán každý 4. kanál, což prakticky poskytuje širší kanálu 20MHz (Poole nedatováno). Mnoho kanálů, které toto pásmo využívá, ovšem spadá mimo pásma ISM. Tímto dochází k různým omezením. Viz Obrázek 5 a Tabulka 3 Kanály pro 5GHz/Tabulka 3.



Obrázek 5 Kanály v pásmu 5 GHz (převzato z Corson nedatováno)



Číslo kanálu	Frekvence v MHz	Využití
<b>36</b>	5180	Vnitřní
<b>40</b>	5200	Vnitřní
<b>44</b>	5220	Vnitřní
<b>48</b>	5240	Vnitřní
<b>52</b>	5260	Vnitřní
<b>56</b>	5280	Vnitřní / DFS / TPC
<b>60</b>	5300	Vnitřní / DFS / TPC
<b>64</b>	5320	Vnitřní / DFS / TPC
<b>100</b>	5500	DFS / TPC
<b>104</b>	5520	DFS / TPC
<b>108</b>	5540	DFS / TPC
<b>112</b>	5560	DFS / TPC
<b>116</b>	5580	DFS / TPC
<b>120</b>	5600	DFS / TPC
<b>124</b>	5620	DFS / TPC
<b>128</b>	5640	DFS / TPC
<b>132</b>	5660	DFS / TPC
<b>136</b>	5680	DFS / TPC
<b>140</b>	5700	DFS / TPC
<b>149</b>	5745	SRD
<b>153</b>	5765	SRD
<b>157</b>	5785	SRD
<b>161</b>	5805	SRD
<b>165</b>	5825	SRD

*Tabulka 3 Kanály pro 5GHz převzato Poole nedatováno*

DFS = Dynamic Frequency Selection/Dynamická selekce fekvence;

TPC = Transmit Power Control/Řízení výkonu vysílače;

SRD = Short Range Devices / Zařízení s malým výkonem maximálně 25 mW;

„V Evropě je kanál 36 až 64 vyhrazen pro použití uvnitř budov. Maximální vysílací výkon činí 200mW“ (Riihikallio 2018), což je 23dBm. V přístupovém bodě (dále jen „AP“) je využití maximálního přenosového výkonu prakticky bezpředmětné, jelikož typické uživatelské zařízení má menší přenosový výkon.

Ve Wi-Fi sítích je spojení vždy obousměrné, tudíž není zapotřebí mít AP, kde nebudeme očekávat odpověď. Obvyklá výchozí hodnota pro AP je maximální výkon, což znamená, že 2,4GHz signál bude přijat o 3dBm silnější, tudíž většina zařízení zvolí 2,4GHz namísto 5GHz pásma.

Kanály 100 až 140 mají maximální výkon 1 W (30dBm) a jsou využívány pro venkovní prostředí. AP prakticky nevyužívají maximální výkon, avšak pro spojení point-to-point můžeme tímto výkonem prodloužit jejich dosah až na 50 km v ideálním prostředí. Kanály 120 až 128 využívají radary na počasí. AP po spuštění bude naslouchat po dobu 10 minut, nežli začne vysílat signál. Na ostatních DFS kanálech 54 až 140 je toto naslouchání pouze 1 minutu (Riihikallio 2018). Pokud AP zaznamená radarový signál, automaticky přepne na jiný kanál. Většina AP vybere neradarové kanály 36 až 48, což může mít za následek překryv těchto kanálů.

Nejvyšší kanály jsou umístěné na lichých číslech od 149 do 165. V Evropě je dovoleno těchto kanálů využívat za předpokladu využití SRD (Riihikallio 2018). Nejsou zde specifikována žádná omezení ani DFS. Ale většina zařízení nepodporuje tento rozsah.

## 7 Přenosové mechanismy

### CCK

Tato modulace, která byla poprvé obsažená ve standardu IEEE 802.11b, řeší problém zvyšování přenosových rychlostí. Jde o modulaci, která nahradila chip neboli Barkerovu sekvenci. Přenášená data, rozdělená po 8-bitech jsou dále dělena na 6 bitů a 2 bity. *6-bitová délka vybírá jednu ze 64 frekvencí o délce osmi čtyřhodnotových symbolů např.:  $(i+1, i-1, -i-1, -i+1)$ . 2 bitová délka vybírá jedno ze čtyř pootočení základní frekvence (ŠIMEK a PETROVIČ, 2013, s.15).* Výsledný signál je předán modulaci QPSK.

### BPSK

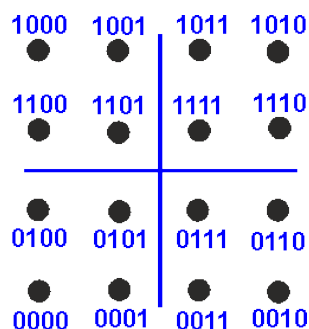
Modulace BPSK patří k zástupcům digitální modulace signálu. Písmeno B nám určuje, že se jedná o binární způsob fázování, a to 0 nebo 1. Jelikož k dispozici máme 360 stupňů, musíme je rozdělit po 180, tedy na 180 a 360.

### QPSK

QPSK je zástupcem digitální modulace signálu, který je šířen prostředím. Tato modulace umožňuje v jednom symbolu přenést dva bity, což znamená, že namísto starších metod, které v jednom symbolu přenášejí pouze 0 nebo 1 je QPSK schopno přenést 00 nebo 11 a jejich různé kombinace (Keim 2016). QPSK nevyužívá frekvence, ale fázové posuny. Jelikož se jedná o Quadrature phase shift keying, je logické, že dostupné budou 4 fázové posuny. Využitím této technologie se zlepšila efektivita šířky pásma, pokud porovnáme se starší metodou BPSK, která k jednomu symbolu může přiřadit pouze jeden bit, dochází u QPSK ke dvojnásobně lepšímu využití šířky pásma.

### QAM

QAM modulace nabízí digitální i analogový formát. Tato práce se zabývá Wi-Fi, tudíž bude zmíněn pouze digitální formát, který je využíván pro Wi-Fi 802.11 rodinu. Analogové přenosy se používají například pro přenos signálů pro AM radiopřijímač. Modulace využívá čtvercovou mřížku, která je souměrná vertikálně i horizontálně. Může obsahovat až 256 bodů (Poole nedatováno). Obrázek 6 znázorňuje 16 bodovou mřížku. Toto umožňuje zvýšení přenosu bitů na symbol. Avšak při maximálním využití 256 bodů je hustota bodů velmi vysoká a může docházet k vyšší náchylnosti k rušení během vysílání.



Obrázek 6 Mapování bitů pro 16-QAM

## DSSS

DSSS neboli Direct Sequence Spread Spectrum je přenosový mechanismus pracující v pásmu 2,4 GHz, který pracuje tak, že každý jednotlivý bit určený k přenosu, je nejprve nahrazen určitou početnější sekvencí bitů (tzv. chipů) (Brisbin 2002). Jde v podstatě o umělé vytvoření redundance. Data jsou vysílána několikrát za sebou. Pro příjemce je jednodušší zaslaná data rekonstruovat. Pro tento přenos je vyžadována šířka komunikačního kanálu 22 MHz (Šimek, Petrovič 2013). Jak bylo popsáno v kapitole 6.1, v pásmu 2,4GHz existují při šířce kanálu 22MHz, tři nepřekrývající se pásma (1-6-11). Tímto způsobem je zajištěna robustnost a omezení rušení vysílaných dat.

## OFDM

Tato technologie byla poprvé využita u standardu 802.11a v 5GHz pásmu. Na rozdíl od technologie DSSS, kde je vytvořen jeden robustní kanál, přes který probíhá přenos, OFDM, respektive Orthogonal Frequency Division Multiplex, rozdělí přenosové pásmo na více podkanálů, kde jsou data přenášena paralelně (Otýpka 2010), Tyto podkanály dosahují mnohem nižších rychlostí, avšak maximální rychlost u využití této technologie je 54Mbit/s.

Každý tok dat využívá jiné nosné frekvence, to však neplatí pro jednotlivé subkanály. Tyto subkanály se částečně překrývají, díky tomu lze efektivněji využít šířku pásma. Tok o šíři 20MHz můžeme rozdělit až na 52 subkanálů, ale pro přenos dat se využívá pouze 48 (Brisbin 2002). Data přenášena v těchto kanálech jsou rozkládána rovnoměrně. Ačkoliv se subkanály částečně překrývají, nedochází k jejich rušení, *jelikož nosné frekvence jsou od sebe vzdáleny o celočíselný násobek převrácené hodnoty délky symbolu* (ŠIMEK a PETROVIČ, 2013, s.16). Výše uvedené platí pouze pro 5GHz síť. U síti 2,4GHz došlo k určitým změnám.

## 8 Šíření elektromagnetický vln

Šíření elektromagnetických vln s rozsahem od 9kHz do 3000 GHz je nazýváno radiofrekvenčním signálem, dále jen RF. Šíření těchto RF signálů ovlivňuje prostředí, ve kterém se vlna šíří, druhým faktorem jsou překážky mezi vysílačem a přijímačem. Prostor může být ovlivňován jinými přístroji, které pracují na stejné frekvenci. Pod pojmem překážky rozumíme skladbu prostředí mezi vysílačem a přijímačem, tedy pokud se zde nachází materiály, které zabraňují anebo snižují prostupnost šíření RF signálů.

Decibel (dB) je jednotkou podílu hodnot dvou signálů. Tato jednotka může vyjadřovat útlum nebo naopak zisk daného signálu. Jednotka dB charakterizuje zařízení z hlediska jeho práce se signálem /zesiluje, zeslabuje/ (Zandl 2003). Jednotka je definovaná jako logaritmická funkce poměru dvou signálů:

$$dB = 10 \log \frac{P_1}{P_2},$$

kde  $P_1$  a  $P_2$  jsou známé signály.

Jednotka dBm neboli decibel miliwatt je nejvíce používanou jednotkou ve všech sledovacích aplikacích a firmwarech, které sledují výkonnost přístrojů vysílajících Wi-Fi signál. Informuje nás o síle signálu, která je vztažena k jednomu miliwattu ( $P_2 = 1\text{mW}$ ). Záporné číslo značí nedostatečný výkon signálu (Zandl 2003).

## 9 Standard IEEE 802.11n

Vzhledem k zamýšlenému zachování zpětné kompatibility může přístroj podporující tuto normu pracovat ve třech režimech (Gast 2012).

1. **Legacy** (pouze 802.11 a, b, g) režim, který duplikuje 20MHz kanál do dvou 20MHz,
2. **Mixed** (obojí 802.11 a, b, g, + n) režim využívá nové technologie MIMO na rozdíl od a,g, které používají starší OFDM technologii,
3. **GreenField** (pouze 802.11 n) režim pracuje bez podpory předchozích verzí. Zvýšena je propustnost dat.

CHARAKTERISTIKA	POPIS
<b>PARAMETER</b>	IEEE 802.11N STANDARD
<b>Maximální datová propustnost</b>	600 Mbit/s
<b>Modulace</b>	CCK, DSSS, nebo OFDM
<b>RF pásmo</b>	2,4GHz nebo 5GHz
<b>Počet prostorových toků</b>	1, 2, 3, nebo 4
<b>Šířka kanálu (MHz)</b>	20, nebo 40

Tabulka 4 IEEE 802.11n shrnutí

Prostorové toky využívané v technologii MIMO umožňují vylepšení rychlosti obsluhy koncových zařízení. Na rozdíl od předchozích technologií, které trpěly na vzájemné rušení, jelikož vysílaly stejné bitové informace ve všech datových tocích. Prostorové toky umožňují vytvoření navzájem se nerušících cest, které dokáží obsloužit více uživatelů (Gast 2012). Standard 802.11n dovoluje až čtyři prostorové toky, které umožňují výrazné zlepšení datové rychlosti, jelikož zprostředkovávají přenos více datových toků na stejný kanál. Počet datových toků a tím i celková datová kapacita je omezena počtem prostorových toků, které nesou. K znázornění, kolik toků je možné použít v závislosti na anténách vysílače a přijímače, nám slouží vzorec:

$$T \times R : S$$

Tento vzorec vyjadřuje počet antén vysílače, který je zastoupen písmenem T. Příjímač je zastoupen písmenem R. Písmeno S nám určuje počet toků. Pravidlo poměru je důležité vždy dodržet. Pokud má zařízení  $S = 2$ , znamená to, že dokáže obsluhovat pouze 2 prostorové toky, protože má k dispozici pouze 2 radiové řetězce pro kódování (Gast 2012). Standard dovoluje použití až  $4 \times 4 : 4$ , avšak více rozšířené konfigurace jsou  $2 \times 2 : 2$ ,  $2 \times 3 : 2$  nebo  $3 \times 2 : 2$ . Tyto konfigurace nabízí stejnou propustnost, ale liší se rozmanitostí použitých antén (Poole nedatováno). Z výše zmíněného můžeme odvodit, že pokud má systém zařízení konfiguraci  $3 \times 3 : 2$ ,  $2 \times 3 : 2$  nebo  $3 \times 2 : 2$ , je výtěžnost v rámci prostorových toků stále 2, tudíž konfigurace se třemi anténami nemá markantní přírůstek na výkon daného systému.

Jeden z problémů využití MIMO je vyšší spotřeba zařízení. Data jsou obvykle vysílána tzv. "bursty", tj. způsobem, kterým jsou data zasílána nesouvisle a systém tak má různé časové prodlevy. Aby se ušetřila energie, je v těchto prodlevách udržováno zařízení jako nečinné, namísto toho, aby bylo v provozu na nejmenší rychlost. Tím se snižuje jeho náročnost na spotřebu energie.

## 9.1 MIMO/SU-MIMO

Jde o zkratku pro technologii "více vstupů více výstupů". Tato metoda se stala základním elementem pro standardy bezdrátové komunikace. V dnešních dobách je hojně využívána vzhledem k větší spolehlivosti a kapacitě než předešlé technologie. Je aplikována u IEEE 802.11n a IEEE 802.11ac, kterými se tato práce zabývá. Základem této technologie je zjednodušeně vysílání na několika prostorově oddělených cestách, které však patří do jednoho společného přenosového kanálu (Poole nedatováno). K tomu se využívají několikanásobné antény, jak na straně přijímače, tak i na straně vysílače.

Vytváří cesty, které nesou data a odděluje cesty pro každou anténu, aby bylo možné využívat více cest ve stejný čas.

Například, mějme signál mezi vysílačem a přijímačem. Signál může využít mnoho cest. Pokud pohneme nebo změníme umístění antény, užití cest se změní. Různost cest závisí také na objektech nebo překážkách, které se nacházejí v cestě mezi přijímačem a vysílačem. V případě technologie MIMO mohou být tyto další cesty využity pro zlepšení robustnosti, redukce šumu, nebo pro větší propustnost datového signálu. Vyřešení těchto problémů nebo zvýšení výkonu těchto zařízení lze dosáhnout pomocí metod, které MIMO nabízí. Tyto metody jsou (Mathuranathan 2014):

1. Spatial diversity/Prostorová diverzita
  - Využívá se především pro zvýšení spolehlivosti signálu.
2. Spatial multiplexing/Prostorové multiplexování
  - Využívá se především pro zvýšení rychlosti přenosu dat.

Jako výsledek použití více antén a MIMO technologie je možné zvýšit kapacitu a propustnost daného, respektive používaného, kanálu při každém zvýšení párových antén.

### 9.1.1 MIMO prostorová diverzita

Přenosový kanál může být narušen nebo může být oslaben natolik, že dojde k chybovému stavu. Princip diverzity zahrnuje odeslání více duplicitních signálů, a tím zredukovat chybovost, zároveň zaručuje vyšší šanci dosažitelnosti signálu koncovému zařízení (Gast 2012, Poole nedatováno). Prostorová diverzita je definována jako:

$$N_T \times N_R$$

Existují 3 druhy diverzit:

1. Časová diverzita
  - Signál je vysílán v různých časech za použití různého kódování.
2. Frekvenční diverzita
  - Signál se šíří na různých frekvencích. Může využívat i různé kanály nebo technologie (OFDM).
3. Prostorová diverzita
  - Využívá různých antén, které jsou umístěny na různých místech, k dosažení lepší spolehlivosti a k dosažení lepší cesty k cílovému zařízení. Základní technologie při využití MIMO.



### 9.1.2 MIMO prostorové multiplexování

Jedna z výhod MIMO multiplexování je zajištění další datové kapacity. V této metodě každý prostorový kanál obsahuje, respektive nese, nezávislou informaci. Toto může být srovnatelné s OFDM, avšak multiplexování, pokud je dodatečný prostor, vytvoří nové podkanály, které jsou umístěné ve stejné pásmové šíři. Výhodou této metody je, že nevyužívá další šíři pásma nebo energii. Zisk multiplexingu lze definovat jako "stupně svobody", respektive degrees of freedom. Počet stupně svobody u zařízení s více anténami je rovný

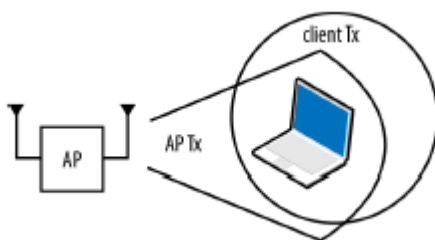
$$(\min(N_T, N_R))$$

kde  $N_T$  vyjadřuje počet vysílacích antén,  $N_R$  vyjadřuje počet přijímacích antén.

## 9.2 Hardware

Standard 802.11n přinesl vylepšení ve formě zdokonalení antén pomocí beamforming a beam diversity.

Antény před příchodem beamformingu vysílaly signály do všech směrů, nezávisle na poloze příjemce. S nástupem beamformingu došlo k omezení tohoto vysílání. Tato metoda umožňuje zaměřit klienta a vysílat signál pouze tím směrem, kde se daný klient nachází. Nepochází k mechanickému posunu antény, ale k tzv. fázovému posunu, který umožní zaměření klienta a následné zúžené vysílání (Gast 2012). Avšak pokud dojde k zaměření klienta a signál je vysílán pouze jedním směrem, může dojít k odmítnutí příjmu jiných signálů z jiných směrů, viz Obrázek 7.



Obrázek 7 Asymetrie u beamformingu (převzato z Gast 2012)

Jelikož v době vývoje bylo nutné implementovat obě ze dvou variant pro beamforming, výrobci se povětšinou rozhodli neimplementovat žádnou nebo pouze jednu variantu, která nemusela být podporována ostatními zařízeními. Varianty těchto metod jsou:

## 1. Explicitní beamforming

Zařízení, respektive beamformer, které má implementovanou tuto metodu, změří před vysláním nejdříve kanál, na který bude vysílat a přímo vypočítá řídicí matici. Tento proces probíhá vysláním tzv. „sounding frame“ cílovému zařízení tzv. „beamformee“, které odpoví, jak byl daný rámec doručen. Díky tomuto procesu lze na beamformerovi vypočítat zmíněnou řídicí matici. Nevýhodou této metody je zpětná nekompatibilitnost. Je nutné, aby koncové zařízení podporovalo metodu měření kanálu a mohlo tak zpět beamformerovi odeslat signál pro vypočítání matice. Starší standardy jako 802.11a nebo g tuto metodu nepodporují, tudíž nebudou dostávat rámce upravené pomocí beamformingu.

## 2. Implicitní beamforming

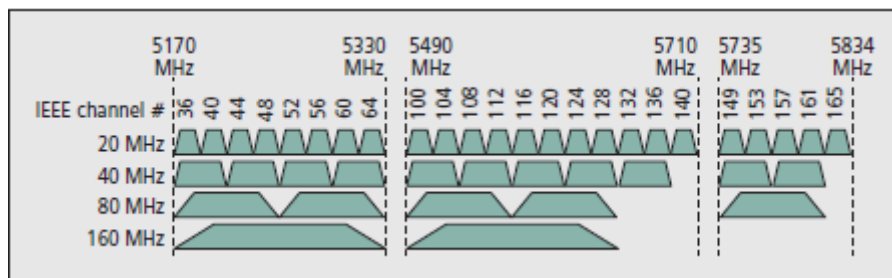
Beamformer podporující tuto metodu mezi sebou nevyměňují speciální rámce pro vypočítání řídicí matice, ale namísto toho odvodí matici z odesílaných rámců nebo z rámců, které byly ztraceny. Tato metoda nenabízí takový výkon jako předchozí metoda, ale je určitým způsobem spojnici mezi všesměrovými anténami a budoucím beamformingem.

Beam diversity využívá více dostupných antén a kombinuje nebo vybírá nejlepší poměr z těchto dostupných antén pro získání optimálního signálu (Poole nedatováno). Tohoto lze dosáhnout díky systému MIMO. Je totiž pravděpodobné, že zde bude nevyužitá anténa. 802.11n podporuje 1 až 4 antény. Díky tomu je možné, že jedno zařízení může mít tři antény a druhé, s nímž komunikuje, bude mít pouze dvě. Přebytková anténa u prvního zařízení může být využita k obslužení jiného zařízení dle potřeby.

## 10 Standard IEEE 802.11ac

Tento standard může využívat až osm prostorových toků a technologii MU-MIMO, kde může využít různé proudy pro obsluhu více různých uživatelů a splnit tak více uživatelský přístup (Poole nedatováno). Například pokud máme zařízení se čtyřmi vysílacími anténami a druhé zařízení se čtyřmi přijímači, čtyři proudy obslouží všechny 4 přijímače. Případně mohou být obslouženi dva uživatelé každý s dvěma proudy. Nejvyšší přenosová rychlost může být dosažena pouze při použití technologie 256-QAM s 160MHz kanálem a obsazenými všemi osmi proudy. V takovémto případě dochází k zredukování počtu dostupných kanálů na jeden. Při využití 80MHz šířky lze využít dva kanály.

Jelikož tento standard podporuje použití 20, 40, 80 a 160MHz, může zde docházet ke spojování kanálů. Toto spojování se týká především 40MHz a 80MHz pásma. Každé z těchto pásem může využít druhé pásmo o stejné velikosti a komunikovat nebo obsluhovat pásmo vyšší úrovně, tedy 40+40MHz může obsloužit 80MHz stejně jako 80+80MHz dokáže komunikovat s 160MHz pásmem (Bejarano aj. 2013). Podmínkou je, že daná spojovaná pásma nesmí být v překryvu, tedy musí jít o pásma, která se vzájemně nepřekrývají a jsou po sobě jdoucí. Obrázek 8 níže popisuje dané spojování.



Obrázek 8 Přehled šířek kanálů v 5GHz (převzato z Berajano 2013)

IEEE 802.11AC	
<b>RF pásmo</b>	5.8 GHz ISM (nelicencované) pásmo
<b>Maximální datová propustnost</b>	6.93 Gbit/s
<b>Přenosová šířka pásma</b>	20, 40, & 80 MHz 160 & 80 + 80 MHz volitelné
<b>Modulace</b>	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM volitelné
<b>MIMO</b>	Single a MU MIMO až s 8 prostorovými toky.
<b>Beam-forming</b>	Volitelný

Tabulka 5 IEEE 802.11ac shrnutí

## 10.1 MIMO / MU MIMO

Multi-User MIMO je zdokonalení původního MIMO přístupu. Z názvu můžeme odvodit, že se jedná o přístup, kde je možné, aby k jednomu vysílači přistupovali více než jeden uživatel. Efektivnost tohoto přístupu se projeví především v prostředích s velkou kapacitou, jako jsou obchodní centra, školy, arény apod. Původní MIMO můžeme chápat jako point-to-point spojení. Aby bylo možné využít tuto technologii, je nutné, aby zařízení podporovala tzv. TxBF jako u SU-MIMO. První verze přístrojů podporující standardy 802.11 n a ac nebyly vybaveny TxBF (Hintersteiner 2016), ale tato mezera byla postupem času díky aktualizacím softwaru eliminována.

Tato metoda přináší i některé nevýhody. TxBF zajišťuje odesílání a přijímání tzv. sound frames, které zjišťují, kde se zařízení nachází. Aby bylo možné sledovat i mobilní zařízení, musí být toto vysílání opakováno v určitém intervalu. V prvních verzích IEEE 802.11 n byly „*sound framy vysílány 40krát za vteřinu což je jeden sound frame každých 25 milisekund*“ (Hintersteiner 2016). Toto přináší další režii do provozu kanálu, a tak zmenšuje výhodu vysílání více uživatelům zároveň. V praxi není nutné, aby zjišťování probíhalo v takto krátkých intervalech. Dále je zapotřebí výsledky zpracovat, což má za následek větší vytížení CPU a paměti zařízení.

Signál vysílače je snížen o 3 dB za každého paralelně připojeného klienta, jelikož napájení je sdíleno mezi všemi paralelními toky. Navíc je v každém signálu pro daného klienta část signálu, která je určena jinému klientovi. Pokud se AP nachází v prostřední, kde jsou již funkční jiná AP s funkcí MU MIMO nebo se vysílání překrývá ve stejných kanálech, dochází k dalšímu rušení a degradaci výhod MU MIMO.

## 10.2 Hardware

Standard 802.11ac přinesl zdokonalení a zjednodušení beamformingu, který byl již popsán v dříve vydaném standardu 802.11n. Předchozí verze beamformingu byla velmi obsáhlá a jednotliví výrobci museli zvolit mezi dvěma metodami. V takovémto případě se většina výrobců rozhodla neimplementovat žádný.

Nový beamforming přináší pouze jednu metodu nazývanou NDP (null data packet). Další vylepšení, které nová verze přináší, je implementace MU-MIMO, která umožňuje obsluhu více uživatelů zároveň. Aby bylo zaručeno správné fungování beamformingu v standardu 802.11ac, je zapotřebí provést kalibraci pomocí channel soundingu, která určuje, v jakém směru je nutné vysílat energii z antény. Tento channel sounding se skládá z několika kroků:

1. Vysílač nebo také beamformer vysílá NDP Announcement rámeček. Tento rámeček má za úkol obsadit kanál a zjistit koncové uživatele/zařízení, též nazývané beamformee. Beamformee poté reaguje a odpovídá na tento rámeček.
2. Beamformer odešle NDP Announcement s hodnotou, ze které příjemce dokáže analyzovat OFDM rámeček a vypočítat řídicí matici (steering matrix).
3. Beamformee přijme rámeček, analyzuje OFDM rámeček a vypočítá řídicí matici. Odpověď pro beamformera je matice odkazující na písmeno V. A odešle odpověď beamformerovi.
4. Beamformer přijme odpověď a z přijaté matice vypočítá řídicí matici, která vypočte cestu pro přímý přenos k beamformee.

Bez řídicí matice by byl signál vysílán do všech směrů bez rozdílu. Využití matice sníží vysílání signálu do určitých míst, ale posílí signál do míst, kde se nachází příjemce. Viz Obrázek 7.

## 11 Standard IEEE 802.11ad

Standard IEEE 802.11ad je standardem, který skýtá velký komerční potenciál. Pracuje v nelicencovaném 60GHz pásmu (Perahia et al 2010). Jelikož se jedná o jednu z nejnovějších metod přenosu, není toto pásmo zcela obsazené, tak jako tomu je například u 2,4GHz a 5GHz. Hlavní předností tohoto standardu je vysoká přenosová rychlost. Provedené zkoušky přenosu signálu z HDMI portu v televizi do HDMI portu v přehrávači pomocí Wi-Fi IEEE 802.11ad potvrdily bezproblémový přenos dat. Výsledkem byl plynulý obraz.

CHARAKTERISTIKA	POPIS
<b>Rozsah operační frekvence</b>	60 GHz ISM
<b>Maximální datová propustnost</b>	7 Gbit/s
<b>Typický dosah</b>	1 - 10 m
<b>Technologie antény</b>	beamforming
<b>Modulace</b>	single carrier a OFDM

*Tabulka 6 IEEE 802.11ad shrnutí*

## 12 Měření přenosu dat pomocí technologie Wi-Fi 802.11ac

Pro měření byl zvolen standard 802.11ac. Jak je výše v kapitole Standard IEEE 802.11ac uvedeno, jedná se o standard, který vylepšil 5GHz pásmo. Zařízení, která byla využita pro tyto testy:

1. Dell Latitude e5440 se síťovou kartou Intel(R) Dual Band Wireless-AC 7260
2. TP-Link Archer C20i
3. Lenovo B51-80 se síťovou kartou Intel(R) Dual Band Wireless-AC 3160

Testována bude nejdříve síla signálu v dBm přes jednotlivé překážky a jedno měření bez překážek. To proto, aby bylo možné srovnávat hodnoty s měřeními, která proběhla přes překážky. Tyto překážky byly zvoleny na základě běžně se vyskytujících materiálů v obytných, či kancelářských prostorech. Těmito materiály jsou: sklo, nosná železobetonová stěna, nenosné, „příčkové“ stěny (sádkokarton, pórobeton, cihly). Měření bude probírat v reálném prostředí, kde bude možnost interference s ostatními Wi-Fi signály, v tomto případě se sítí eduroam, a jinými sítěmi, které se vyskytují v třetím nadzemním podlaží budovy Fakulty Informatiky a Managementu. Po těchto měřeních bude vytvořena tzv. „heatmapa“, která bude zanesena do plánu měřeného prostředí, pro lepší orientaci v naměřených hodnotách.

Způsob měření bude založen na jednom AP a jednom přijímači (notebook). Měření bude probíhat na různých šířích kanálů od 20MHz až po 80MHz v pásmu 5GHz a pro pásmo 2,4GHz bude proveden test pro šíři kanálu 40MHz. Toto měření se oprostí od zkoumání rozdílu mezi IPv4 a IPv6, jelikož dle diskuzí a uvedených příkladů na webu Superuser v článku Is IPv6 'faster' than IPv4, je tento rozdíl téměř neznamenný až zanedbatelný, jak uvádí autor Staff Writer článku IPv4 vs IPv6 – Performance comparison, že i tento rozdíl je v běžném provozu prakticky zanedbatelný.

Druhou fází testování bude reálné měření rychlosti přenosu dat přes jednotlivé překážky. Postup bude obdobný jako u měření síly signálu. Výjimkou však bude počet zařízení, aby bylo měření co nejbližší realitě, kdy spolu komunikují zejména dvě zařízení přes AP. (Specifikace notebooků a AP jsou uvedeny na začátku této kapitoly).

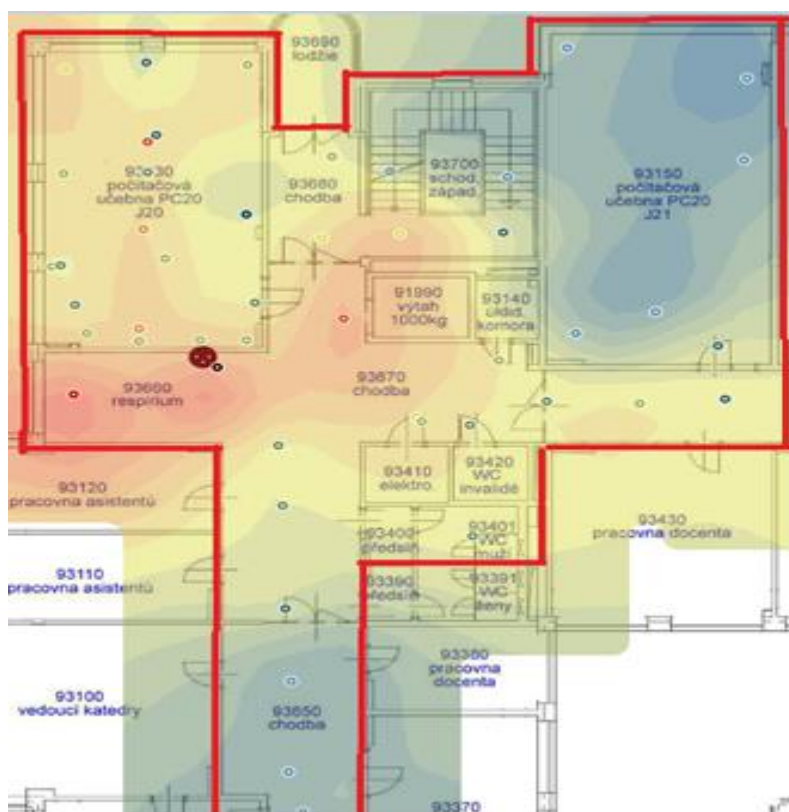
Měření bude založeno na odesílání různé velikosti souborů. První měření bude probíhat z krátké vzdálenosti, a to proto, abychom mohli určit maximální rychlost, kdy nebude docházet ke stínění přenosu překážkami, které by se mohly nacházet v cestě přenosového signálu. Velkosti budou následující: 1kB,1MB,1GB. Pozornost zaměříme na sledování rozdílnosti rychlosti pro jednotlivé velikosti souborů, tedy pokud se liší jednotlivé přenosové rychlosti a o kolik se liší. Závěrem bude zhodnocení naměřených výsledků a porovnání těchto výsledků s teoretickými hodnotami, které jsou uváděny pro daný standard a hodnotami, které uvádí výrobce.

## **12.1 Měření síly signálu**

Měření síly signálu probíhalo v budově Univerzity Hradec Králové, Fakulty Informatiky a managementu. Pro měření jsem zvolil třetí nadzemní podlaží této budovy. U routeru TP-Link ArcherC 20i 750ac bylo postupně vynucené nastavení šíře kanálu (20GHz,40MHz, 80MHz) a standard 802.11ac (5GHz).. Volba kanálu byla ponechána v nastavení „auto“. Na závěr bylo uskutečněno měření pro standard 802.11n (2,4GHz) s šíří signálu 40MHz a automatickou volbou kanálu, pro porovnání rozdílu prostupnosti mezi 5GHz a 2,4GHz šíření signálu. Za využití notebooku Dell Latitude e5440, pomocí programu VisiWave Site Survey. Rozsah měřicího programu byl nastaven na hodnoty od -99dBm až do -32dBm. Zachycené údaje jsou uvedeny níže.



## Měření síly signálu pro 20MHz v 5GHz pásmu



Obrázek 9 Heatmapa pro 802.11ac/20MHz třetího podlaží

Na výše uvedeném obrázku Obrázek 9 Heatmapa pro 802.11ac/20MHz třetího podlaží **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je znázorněno měření pro šíři kanálu 20MHz. Můžeme vidět, že průchod skrz překážky typu “příčková” stěna je poměrně bezproblémový s maximálním útlumem. -75dBm, kdy měření tohoto bodu probíhalo ve vzdálenosti 4,6 metrů od AP. Avšak pokud dojde k interakci se stěnou, která je “nosná” nebo pokud dojde k průniku signálu více než jednou “příčkovou” stěnou, útlum signálu je v rozmezí -98,5dBm až -98dBm s průměrnou vzdáleností 16,4metrů od AP, přičemž pokud se jedná o útlum takového rozsahu propustnost a rychlost přenosu dat je velmi pomalá a v určitých případech je přenos prakticky nemožný. Průchod skrze skleněné dveře nečinní signálu značnou překážku, ale i tak dochází k maximálnímu útlumu --70dBm ve vzdálenosti 10.5 metru. Tento výsledek je ovlivněn velkým počtem jiného signálu Wi-Fi a dochází zde ke značným interferencím. Pokud tento výsledek vynecháme jako chybový, dostáváme se na maximální útlum -57dBm ve vzdálenosti 22,6 metrů. Při měření v druhém nadzemním podlaží tedy o jedno patro níže, byly naměřeny hodnoty pohybující se v rozmezí od -80dBm do -93dBm. Avšak signál byl zachytitelný pouze na západním schodišti, na Obrázku 9 nesoucí označení číslo 93700. Po opuštění schodiště, došlo ke

ztrátě signálu pravděpodobně z důvodu přenášení signálu skrze strop/podlahu, který je vyroben z železobetonového masivu a síla Wi-Fi signálu tímto masivem neprojde. Můžeme tak usoudit, že signál zachycený na schodišti byl signál, který se byl schopen díky odrazům dostat z třetího nadzemního podlaží až do druhého nadzemního podlaží požárního schodiště.

### Měření síly signálu pro 40MHz v 5GHz pásmu

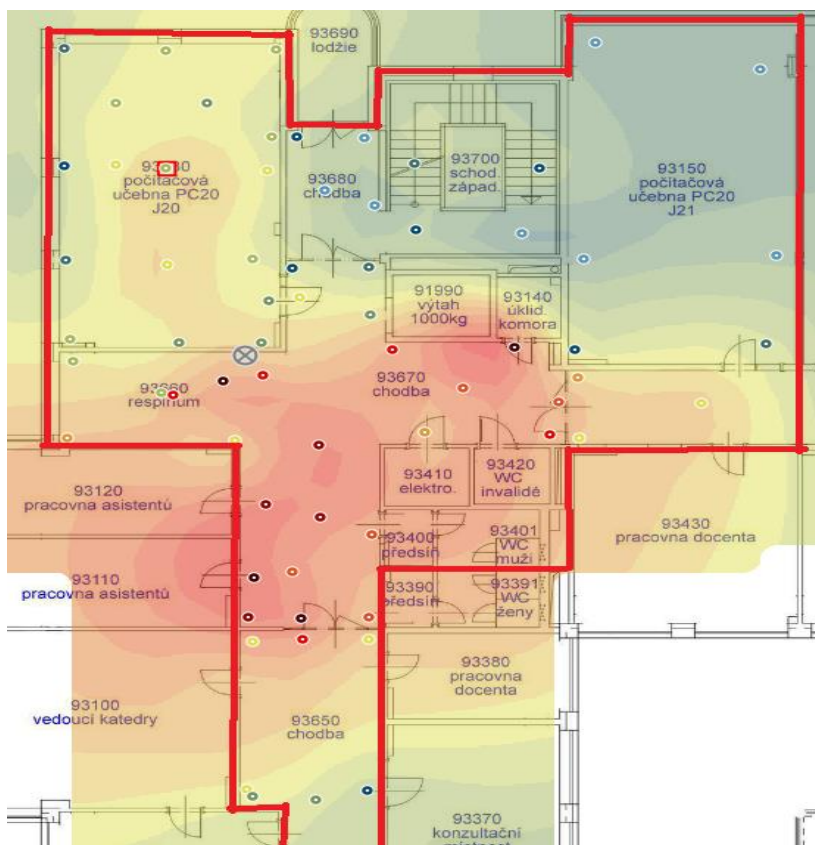


Obrázek 10 Heatmapa pro 802.11ac/40MHz třetího podlaží

Na výše uvedeném Obrázku 10 Heatmapa pro 802.11ac/40MHz třetího podlaží je znázorněno měření pro šíři kanálu 40MHz. Průchod skrz překážku typu „příčková“ stěna je u šíře kanálu 40MHz optimální, tedy dochází k nejmenšímu útlumu ze všech tří provedených měření. Maximální útlum pro 40MHz činí -61dBm ve vzdálenosti 8,45 metrů. Dojde-li k interakci signálu s více než jednou „příčkovou“ nebo s „nosnou stěnou“, útlum signálu se bude pohybovat v rozmezí -65dBm až -79dBm s průměrnou vzdáleností 17,24 metrů. Tento výsledek ukazuje zatím nejlepší průnik signálu skrz stěny. Toto rozmezí je pro provoz sítě snesitelné a v mnoha případech se vyskytuje v reálném

přenosovém prostředí panelových bytů na vzdáleném konci od AP. Průchod skrz skleněné dveře na vzdálenost 23,08 metrů činí útlum signálu v 40MHz kanálu -63dBm. Při měření v druhém nadzemním podlaží, tedy o jedno patro níže, byly naměřeny hodnoty podobající se signálu v 20MHz širší kanálu.

### Měření síly signálu pro 80MHz v 5GHz pásmu

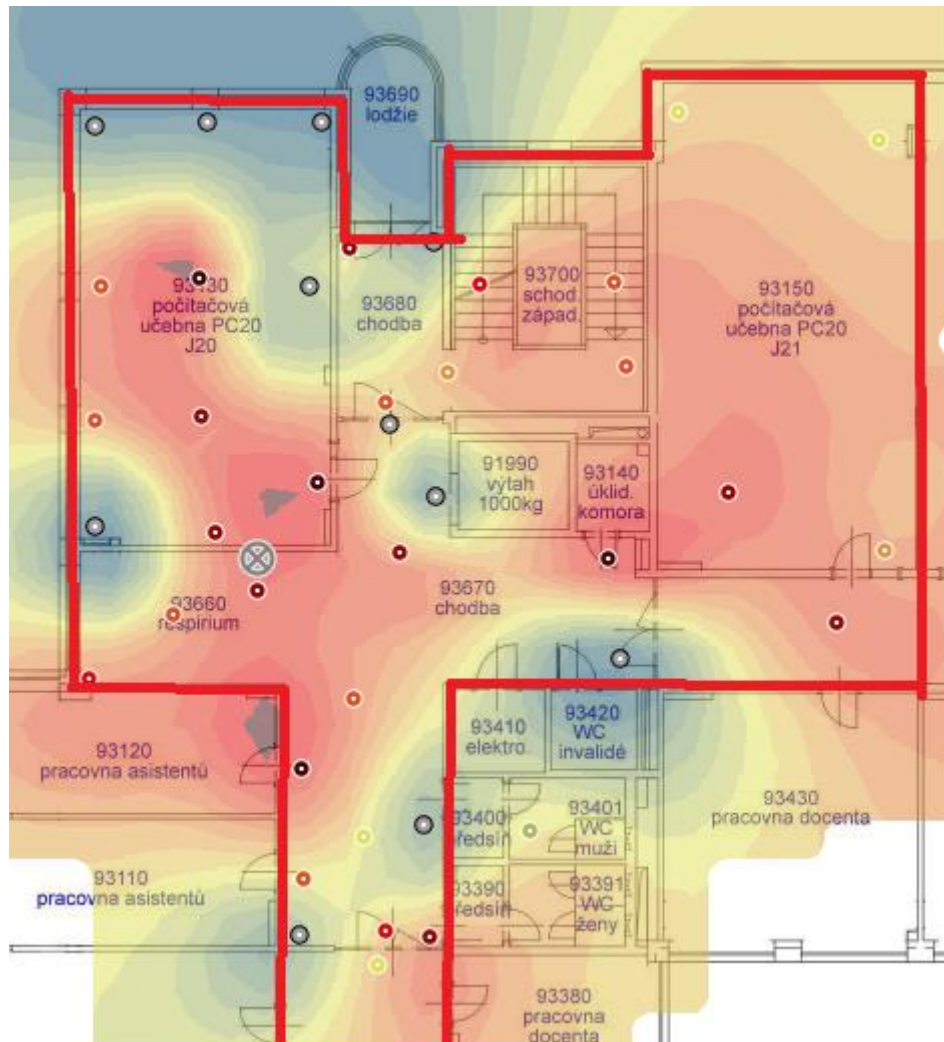


Obrázek 11 Heatmapa pro 802.11ac/80MHz třetího podlaží

Na výše uvedeném Obrázku 11 Heatmapa pro 802.11ac/80MHz třetího podlaží je znázorněno měření pro širší kanálu 80MHz. Průchod skrz překážku typu “příčková” stěna se příliš mnoho neliší od šíře kanálu 20MHz. Maximální útlum pro 80MHz činí -75dBm, avšak ve vzdálenosti 9,15 metrů. Ovšem pokud dojde k interakci se stěnou, která je “nosná” nebo pokud dojde k průniku signálu více než jednou “příčkovou” stěnou, útlum signálu se pohybuje v rozmezí -77dBm až -92dBm s průměrnou vzdáleností 15,87 metrů od AP. Dolní hranice tohoto útlumu je pro provoz sítě ještě snesitelná, avšak maximální útlum -92dBm je v mnoha případech již kritická hodnota a síť v tomto útlumu je prakticky nevyužitelná. Průchod skrze skleněné dveře nečiní signálu značnou překážku, ale i tak dochází k maximálnímu útlumu -85dBm ve vzdálenosti 21,88 metrů. Při měření v druhém nadzemním podlaží, tedy o jedno patro níže, byly naměřeny hodnoty pohybující se

v rozmezí od -81dBm do -83dBm. Avšak signál byl zachytitelný stejně jako u předchozích měření pouze na západním schodišti na Obrázku 11 nesoucí označení číslo 93700. Po opuštění schodišťové části došlo k výpadku signálu.

### Síla signálu pro 2,4GHz pásmo s šíří kanálu 40MHz



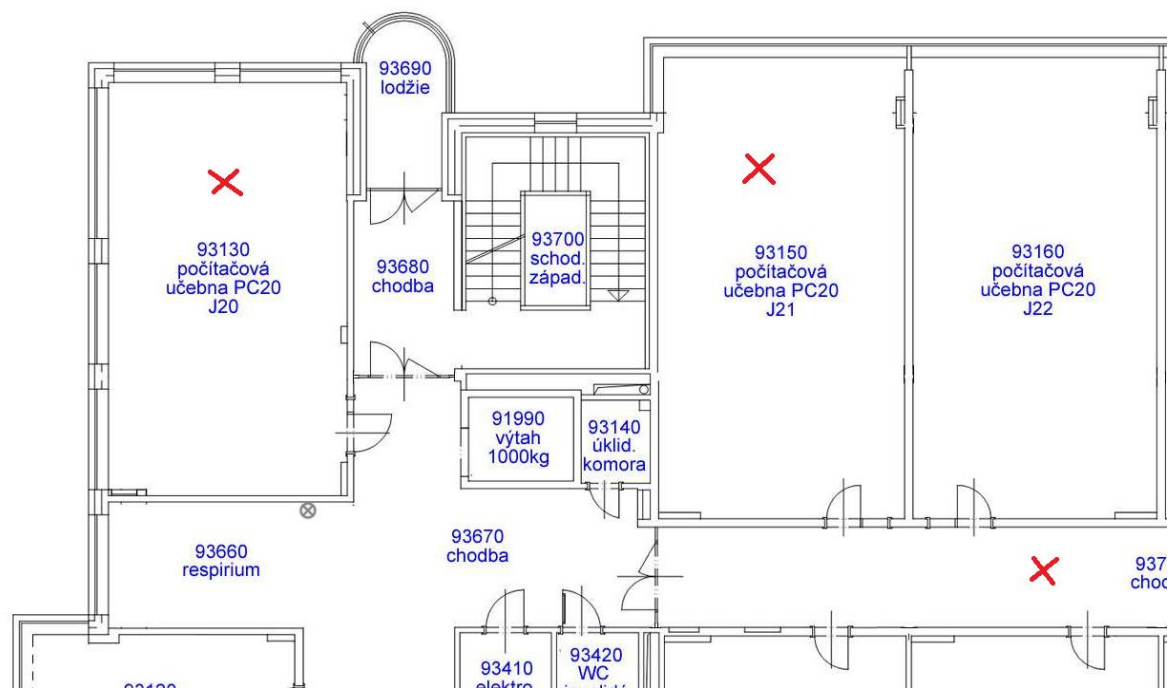
Obrázek 12 Heatmapa pro 802.11n/40MHz třetího podlaží

Výše uvedený Obrázek 12 Heatmapa pro 802.11n/40MHz třetího podlaží znázorňuje naměřené hodnoty pro 2,4GHz pásmo o šířce kanálu 40MHz. Jak můžeme pozorovat, útlum signálu skrze překážky je značně menší, nežli je tomu u pásma 5GHz, v jakékoli šíři kanálu (20MHz, 40MHz, 80MHz). Avšak také můžeme pozorovat značnou degradaci signálu ve větších vzdálenostech od AP.

## 12.2 Měření datového toku

Měření datového toku, probíhalo pomocí programu iPerf3. Tento program nabízí nastavení serveru i klienta a umožňuje měření maximální rychlosti, která je v daný moment dostupná mezi těmito dvěma zařízeními. Tento program umožňuje nastavení velikosti souboru, který budeme testovat, dále nabízí mnoho dalších funkcí jako omezení přenášených dat například na 1 kB atp. Měření datové toku probíhalo na stejném místě jako měření síly signálu díky různorodým překážkám. Na závěr bylo uskutečněno měření pro standard 802.11n v 2,4GHz pásmu pro porovnání hodnot, jelikož vzhledem k frekvenci by tyto hodnoty měly být vyšší, zvláště pak při prostupnosti skrz překážky. Na Obrázku 13 níže jsou uvedeny body, na kterých probíhalo měření a umístění AP a jednotlivých notebooků, které sloužily jako server a klient. Měření datového toku probíhala po 60 vteřinách, kdy byl každou vteřinu měřen maximální průtok dat. Obrázek 13 nám znázorňuje pozice měření, tyto pozice jsou označeny červeným křížkem. AP se nachází v respiriu č. 93660, znázorněno je šedivým kroužkem s křížkem. Měření přes „příčkovou“ stěnu se nachází ve vzdálenosti 10,3 metrů. Měření pro složené překážky se nachází 17,1 metrů a měření přes skleněnou stěnu se nachází 20 metrů od AP.

### Budova FIM - 3.NP



Obrázek 13 Pozice měření



## **Měření datového toku pro 20MHz pásma 5GHz**

Nejdříve proběhlo měření, kdy nebyly v cestě žádné překážky, abychom mohli srovnávat hodnoty naměřené po průchodu danou překážkou. Pro data o velikosti 1 kB, jako u zbylých dvou šíří kanálu, i zde se rychlost pohybovala v rámci několika Kbitů za vteřinu, tyto hodnoty v průměru nabývaly 8,26Kbit/s. Pro velikost 1 MB došlo k menšímu odchýlení, kdy průměrná rychlost dosahovala 8,59Mbit/s, což je méně, než u zbylých dvou šíří kanálu. Podobná situace nastala pro měření souborů o objemu větším nežli 1 MB, kdy průměrná rychlost dosahovala 24,16Mbit/s.

Při měření přes „příčkovou“ stěnu, viz Obrázek 13, došlo k menšímu poklesu rychlosti při přenášení 1 kB dat až na průměrnou hodnotu 6,89Kbit/s. Po nastavení 1 MB přenášených dat byla naměřena průměrná hodnota 3,66Mbit/s. Během testu pro velkoobjemový soubor byla naměřená průměrná hodnota 10,23Mbit/s. Výsledky ukazují nemalý pokles přenosu dat pouze v případě, když signál stíní jenom stěna nenosného charakteru, tedy neobsahuje množství železných prvků jako stěna nosná.

Přenášení 1 kB dat přes stěny s různou skladbou (nosná stěna, příčková stěna, výtahová šachta) došlo ke zpomalení přenosu dat téměř na polovinu z původní hodnoty až na průměrných 4,92Kbit/s. Během testu přenášení 1 MB dat byla naměřena průměrná rychlost přenosu 1,39Mbit/s. Při přenášení velkoobjemového souboru byly naměřeny průměrné hodnoty 1,851Mbit/s, jelikož signál byl v dané oblasti velmi utlumený, docházelo při přenosu větších souborů k výpadku signálu.

Při měření datového toku přes prosklené dveře a vzdálenosti 20 metrů od AP došlo k redukci signálu na průměrnou přenosovou rychlost 4,82Kbit/s. Během měření datového toku pro 1 MB dosahovala průměrná rychlost 4,17Mbit/s. Měření velkoobjemových dat nám ukázalo průměrnou rychlost 9,71Mbit/s.

## **Měření datového toku pro 40MHz pásma 5GHz**

Měření pro 40MHz šíří kanálu probíhalo stejně jako pro 20MHz. Při nízkém objemu jednotlivých odesílaných dat (1 kB) bez překážky se hodnoty příliš nelišily. Hodnoty rychlosti přenosu se v průměru pohybovaly okolo 8,59Kbit/s. Při zvýšení objemu dat na 1 MB došlo též k nárůstu rychlosti, která dosahovala v průměru 11,34Mbit/s. Při přenosu velkoobjemových dat byla rychlost velmi nestabilní a dosahovala hodnot od 19Mbit/s až po 77Mbit/s. Pokud vyloučíme tyto kritické hodnoty, dostáváme průměrnou

rychlost přenosu 51,5Mbit/s. To je v porovnání s 20MHz šíří kanálu značný nárůst v rychlosti pro velkoobjemová data.

Měření přes „příčkovou“ stěnu probíhala stejně jako u 20MHz šíře kanálu. Výsledné hodnoty pro toto měření jsou 4,4Kbit/s pro 1 kB soubory, 4,08Mbit/s pro data o velikosti 1 MB a 17,64Mbit/s pro velkoobjemové soubory. Můžeme pozorovat rozdíl s 20MHz šíří kanálu, kdy při menších souborech je nepatrně rychlejší právě 20MHz pásmo. Pokud však dojde na přenos velkoobjemových dat, šíře kanálu 40MHz má znatelně vyšší rychlost i přes danou „příčkovou“ zeď.

Přenášení 1 kB dat přes stěny s různou skladbou (nosná stěna, příčková stěna, výtahová šachta) probíhalo identicky jako u šíře kanálu 20MHz. Naměřené hodnoty jsou poměrně překvapující. Tyto průměrné hodnoty jsou: 4,81Kbit/s pro přenos 1 kB dat, 1,85 Mbit/s pro 1MB data a 699Kbit/s pro velkoobjemová data. Takto nízké hodnoty mohly být způsobeny výskytem dalších 9 AP, které vysílaly na stejné frekvenci se stejnou šíří pásma. Jak můžeme sledovat, není zde značné a znatelné zlepšení v porovnání s 20MHz šíří kanálu, ba naopak u velkoobjemových dat dochází k značnému útlumu signálu. Jak je uvedeno výše, tento jev může být způsoben výskytem AP, které jsou naladěné na stejnou frekvenci a vysílají na stejném kanálu se stejnou šíří kanálu, tedy 40MHz.

Hodnoty naměřené na vzdálenost 20 metrů od AP přes skleněné dveře jsou následující: 4,75Kbit/s pro 1 kB data, 4,64Mbit/s pro 1 MB data a pro velkoobjemová data 14,3Mbit/s. Zde můžeme pozorovat značné zlepšení pouze u velkoobjemových dat, u kterých je přenos rychlejší o 4,59Mbit/s.

### **Měření datového toku pro 80MHz pásma 5GHz**

Toto měření probíhalo stejným způsobem jako dvě předchozí. Avšak během měření 80MHz šíře pásma docházelo ke značným výkyvům v jednotlivých měřeních. K nejvyšším výkyvům docházelo právě během měření menších souborů, kdy hodnoty kolísaly od 1,98Kbit/s až po 9,08Kbit/s. Tento jev mohl být opět vyvolán interferencí s ostatními Wi-Fi signály, jelikož se však snažíme napodobit prostředí kanceláře či bytu, kde dochází též ke značným interferencím, proto dané zahrneme do výsledků z měření. Po zvýšení objemu přenášených dat 1 MB se rychlost přenášených dat zvýšila, avšak zachovala si svou kolísavost, která se opět pohybovala od 6,42Mbit/s až po 13,5Mbit/s. Tento rozptyl není markantní jako u 1 kB souboru, avšak takovýto rozptyl nemůže být ignorován a pro stabilní Wi-Fi připojení je nevhodný. Opět by bylo vhodné využít 40MHz šíře pásma, která

nabízí větší stabilitu v přenosu souborů v řádu MB. Během testu pro velkoobjemová data bylo dosaženo rychlosti 63,48Mbit/s, během tohoto testu už nedocházelo k markantním výkyvům, jako tomu bylo u 1 kB a 1 MB dat.

Hodnoty naměřené přes překážku typu „příčková“ stěna byly následující: 4,42Kbit/s pro 1 kB data, pro 1 MB data byla průměrná rychlost 3,98Mbit/s a pro velkoobjemová data byla naměřena rychlost 25,56Mbit/s. Můžeme pozorovat růst rychlosti v segmentu velkoobjemových souborů, kde radikálně stoupá rychlost při zvýšení šíře kanálu, a to i přes výše zmíněnou překážku.

Další test probíhal přenášením dat přes překážku s různou skladbou (nosná stěna, příčková stěna, výtahová šachta), která je zmíněna u 20MHz šíře kanálu. Hodnoty pro tento test: 4,9Kbit/s pro 1 kB data, pro 1 MB data byla výsledná průměrná rychlost 2,6Mbit/s. Velkoobjemový přenos souborů dosahoval rychlosti 1.68Mbit/s.

Test, který testoval rychlost přenosu velkoobjemových dat na vzdálenost 20metrů přes skleněné dveře, dosáhl průměrných rychlostí: 4,69Kbit/s pro 1 kB data, 3,16Mbit/s pro 1 MB data a pro velkoobjemová data byla průměrná rychlost 4,89Mbit/s.



## **Měření datového toku pro 40MHz pásma 2,4GHz**

Měření v pásmu 2,4GHz probíhalo identicky jako u pásma 5GHz. Pásmo 2,4GHz využívá šíří kanálu 20MHz a 40MHz jak je uvedeno v teoretické části této práce. Pro tento test byla zvolena šíře 40MHz. Hodnoty pro bezpřekážkový přenos byly v průměru 4,61Kbit/s pro 1 kB soubory. Pro soubory o velikosti 1 MB byla průměrná rychlost 2,78Mbit/s a pro velkoobjemové soubory byla naměřena průměrná rychlost dosahující 14,2Mbit/s, přičemž během tohoto testu docházelo ke značným výkyvům rychlostí. Můžeme taktéž pozorovat značný pokles rychlostí oproti standardu 802.11ac a jeho 5GHz pásmu.

Hodnoty naměřené přes překážku typu „příčková“ stěna byly následující: 4,45Kbit/s pro 1 kB data, pro 1 MB data byla průměrná rychlost 782Kbit/s a pro velkoobjemová data byla naměřena rychlost 9,26 Mbit/s.

Přenášení dat skrz překážku s různou skladbou (nosná stěna, příčková stěna, výtahová šachta), která je zmíněna u 40MHz šíře kanálu. Hodnoty pro tento test: 4,6Kbit/s pro 1 kB data, pro 1 MB data byla výsledná průměrná rychlost 1,71Mbit/s. Velkoobjemový přenos souborů dosahoval rychlosti 8,98Mbit/s. Během přenášení signálu přes překážku s různou skladbou můžeme pozorovat, že signál v pásmu 2,4GHz netrpí takovým útlumem jako signál v pásmu 5GHz.

Během testování rychlosti přenosu velkoobjemových dat na vzdálenost 20 metrů přes skleněné dveře byly naměřeny tyto hodnoty: pro 1 kB byla průměrná rychlost 4,17Kbit/s pro 1MB soubory 1,35Mbit/s a pro velkoobjemové soubory byla naměřena průměrná rychlost 6,85Mbit/s.

## 13 Vyhodnocení výsledků

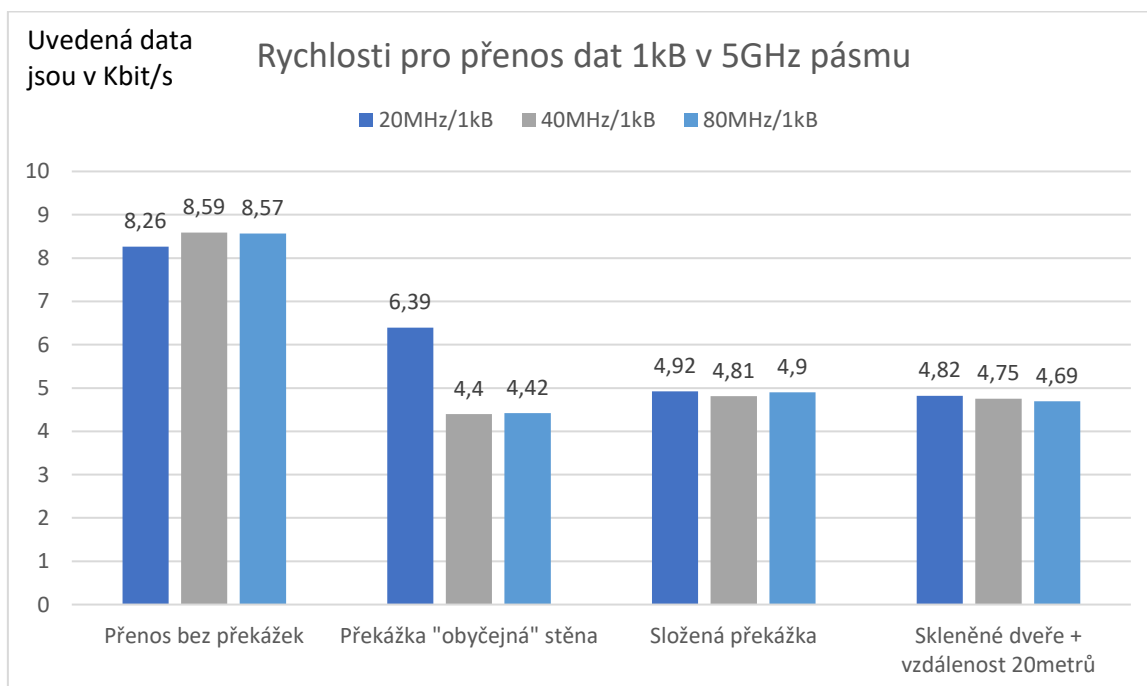
Výsledky, které nám přinesla “heatmapa” pro 5GHz pásmo jsou poměrně překvapivé, jelikož kanál o šířce 20MHz dle měření nenabízí příliš vysokou prostupnost přenášených dat přes překážky.

Kanál o šířce 80MHz nabízí nejrychlejší spojení mezi klientem a AP, avšak při průchodu zdí, dochází k rapidnímu útlumu a rychlost přenášených dat značně klesá.

Naopak kanál o šířce 40MHz nabízí, dle měření, kompromis mezi prostupností přes překážky a rychlostí. Je obecně známo, že prostupnost 5GHz pásma přes stěny je horší, než v případě pásma o šířce 2,4GHz. Tuto skutečnost můžeme také pozorovat na Obrázek 12, který zobrazuje “heatmapu” pro zmíněné pásmo 2,4GHz.

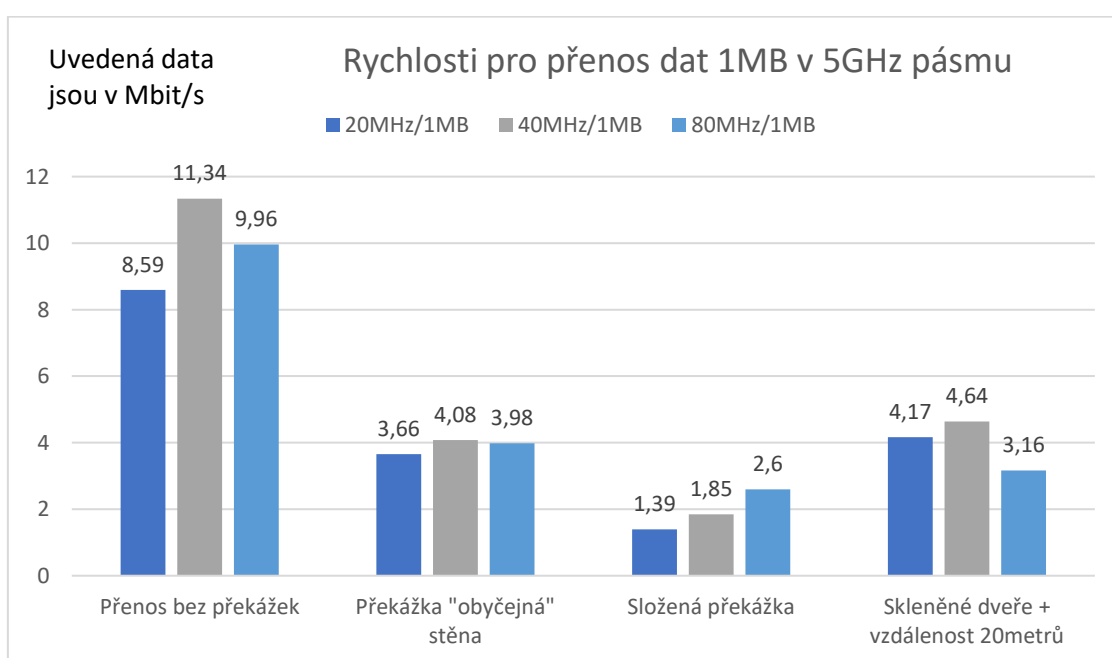
### Výsledky pro pásmo 5GHz

Níže uvedené grafy nám shrnují výsledek všech naměřených testů, které byly provedeny. Jak můžeme vidět na Graf 1, pro 1kB data v 5GHz pásmu, při přenosu bez překážek, nejsou vidět znatelné výkyvy a rychlosti jsou téměř vyrovnané. Při přechodu přes „příčkovou“ stěnu došlo ke změně, kdy nejrychlejší přenos nabízel kanál o šířce 20MHz. Pro složenou překážku a skleněné dveře můžeme tvrdit, že rychlosti u všech tří kanálů jsou srovnatelné, jelikož se navzájem příliš neliší.



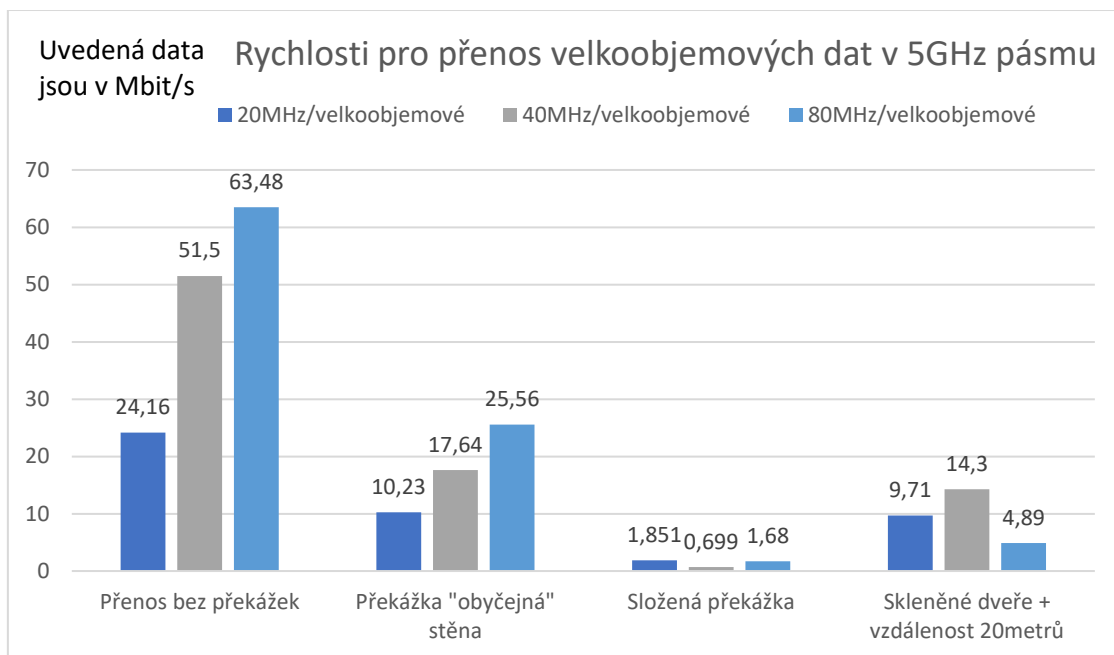
Graf 1 Rychlosti pro přenos dat 1 kB

Níže uvedený Graf 2 znázorňuje rychlosti pro přenos dat o velikosti 1 MB v 5 GHz pásmu. U přenosu bez překážek můžeme pozorovat, že nejlépe dopadl kanál o šířce 40MHz, který byl též během testu nejstabilnější. Během přenosu dat přes „příčkovou“ stěnu došlo k značné redukci rychlosti, a můžeme pozorovat, že rozdíl mezi jednotlivými kanály je vyrovnaný, až na šíři kanálu 20MHz, která byla nejpomalejší. U složené překážky a vzdálenosti 20 metrů od AP, sledujeme zvrát v rychlostech, kdy se nám do popředí dostává 80MHz širší kanálu. Tento výsledek je zajímavý, jelikož dle logiky věci, by mělo užší pásmo lépe proniknout překážkami. Výsledky ale hovoří jasně ve prospěch 80MHz širší kanálu. Ovšem u přenosu na 20 metrů můžeme opět pozorovat nejvyšší rychlost u kanálu šíře 40MHz.



Graf 2 Rychlosti pro přenos dat 1 MB

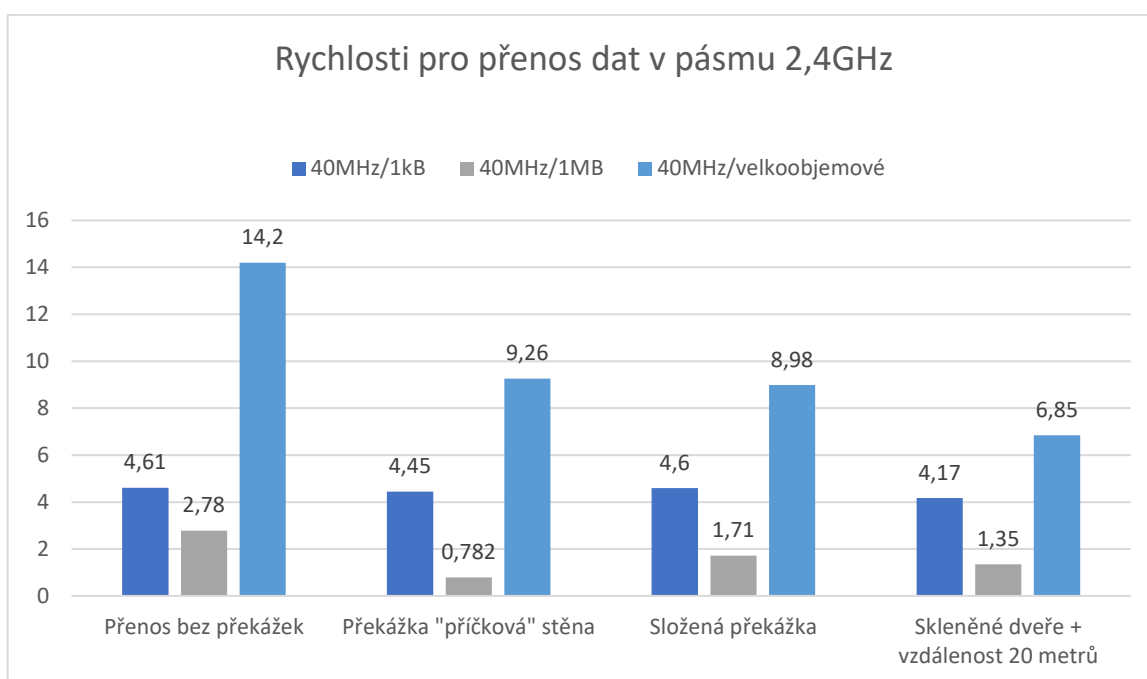
Data, která se nacházejí v níže uvedeném Graf 3, shrnují přenos velkoobjemových dat. Při bezpřekážkovém přenosu lze pozorovat nejrychlejší přenos v případě kanálu o šířce 80MHz, což je logické, jelikož nabízí největší propustnost dat. Při překážce „příčková“ stěna se tento trend nezměnil a 80MHz šíře kanálu byla opět nejrychlejší variantou. Při složené překážce došlo k značnému útlumu, a to pro všechny typy šíře kanálu. Nejhůře v tomto případě dopadl kanál o šířce 40MHz, nejlépe však 20MHz. Při vzdálenosti 20 metrů od AP si opět nejlépe vedl kanál o šířce 40MHz.



Graf 3 Rychlosti pro přenos velkoobjemových dat

## Výsledky pro pásmo 2,4GHz

Souhrn pro měření 2,4GHz pásma nám shrnuje níže uvedený Graf 4. Nejdůležitější informací pro tuto bakalářskou práci je údaj pro přenos souborů přes překážku s různou skladbou (nosná stěna, příčková stěna, výtahová šachta). Jelikož potvrzuje domněnku, že signál v pásmu 2,4GHz má lepší vlastnosti, pro přechod skrz výše zmíněnou překážku a nedochází k tak značnému útlumu jako je tomu v pásmu 5GHz. Uvedené údaje pro 1 kB data jsou uvedena v Kbit/s pro 1 MB a velkoobjemová data jsou hodnoty uvedeny v Mbit/s.



Graf 4 Rychlosti pro přenos dat v pásmu 2,4GHz

Výsledky z měření datového toku pro 5GHz pásmo jsou zajímavé, jelikož přenášáním více souborů menší velikosti, v tomto případě 1 kB, se průměrná rychlost výrazně neliší mezi všemi třemi normami. Pokud se však zaměříme na jednotlivé průběhy testů, zjistíme, že nestabilnějším je kanál o šířce 40MHz v námi testovaném prostředí. Kanál o šířce 40MHz sice nedominuje na překážkách jako nejrychlejší, avšak výkyvy během měření byly téměř neznamatelné. Z tohoto měření vyplývá, že pro kancelář, která neobsahuje žádné překážky, je vhodné použít 5GHz pásmo s širší kanálu 80MHz, jelikož nabízí nejrychlejší přenos dat.

Stejně tak můžeme tvrdit, že u stěny, která je tvořena cihlami či pórobetonem, průnik signálu v této šíři též nedělá problémy. Pro složené překážky, by bylo vhodné doporučit využití pásma 2,4GHz, které nabízí lepší prostupnost a dokáže tak nabídnout rychlejší přenos dat než pásmo 5GHz. Tento fakt se též potvrdil v testu pro 2,4GHz pásmo. Na vzdálenost 20 metrů přes skleněné dveře je nejvhodnější využití kanálu o šířce 40MHz v pásmu 5GHz, která dokáže nabídnout nejrychlejší přenos z výše zmíněných šíří. Tato doporučení se vztahují pouze na přenášání velkoobjemových dat.

## 14 Závěr

Cílem této práce bylo naměření hodnot datového přenosu přes jednotlivé překážky (nosná železobetonová zeď, příčky z pórobetonů, pálených cihel, skleněné dveře/stěny) a výsledné srovnání těchto rychlostí u zařízení podporující standard 802.11ac. Dílčím cílem bylo srovnání 5GHz pásma s 2,4GHz pásmem a porovnání hodnot udávaných výrobcem s reálně naměřenými hodnotami.

Standardy, kterými se tato práce zabývala patří k jedněm z nejvíce používaných standardů v dnešní době. Z tohoto důvodu byly také vybrány pro praktický test. Můžeme říci, že většina uživatelů volí právě standard 802.11n s pásmem 2,4GHz kvůli jeho lepším vlastnostem dostupnosti skrz složené překážky a ceně.

U standardu 802.11ac je uváděna maximální rychlost 6,77Gbit/s. Tato hodnota je však pro běžně zakoupené AP, které se pohybuje v řádu do 2000Kč nedosažitelná, reálnější hodnota je rychlost 433Mbit/s, která je zároveň uvedena na testovaném zařízení. Dle testu můžeme tvrdit, že daná deklarovaná rychlost je nedosažitelná v reálném prostředí, jelikož nejvyšší naměřená hodnota dosahovala stěží 100Mbit/s. Tento fakt by měl být též uveden na přístroji, jelikož během vytváření domácí, či kancelářské sítě dokáže usnadnit práci s navrhováním dané sítě a uspokojit tak zákaznickovy požadavky.

Měření také ukázalo, že danou technologii není vhodné využívat v prostředí, které je velmi členité, což znamená, není vhodné používat, pokud se v prostředí nachází stěny, které obsahují železné prvky, jelikož dochází k značným ztrátám a v některých případech až zcela ke ztrátě signálu. V takovémto prostředí je vhodnější použít standard 802.11n s 2,4GHz, který lépe projde daným materiálem. Avšak nejefektivnější variantou je umístění AP podporující standard 802.11ac do každé místnosti. Díky tomu lze předejít přecházení signálu přes stěny. Tato varianta je však finančně náročná.

Vyhodnocení výsledků měření realizovaných v rámci této bakalářské práce ukazují, že rychlosti deklarované výrobcem se zřetelně liší od hodnot, které byly naměřeny v reálném prostředí. Dále byla vyhodnocena rychlost přenosu dat při použití jednotlivých kanálů o různých šířkách a v rozdílných podmínkách a současně byla prověřena vhodnost využití pásma 2,4GHz.

## 15 Zkratky

**DLC** = spojová vrstva

**PHY** = fyzická vrstva

**LLC** = Logical Link Control neboli řízení logického spoje

**MAC** = Media Access Control neboli řízení přístupu k médiu

**PMD** = Physical Medium Dependent

**PLCP** = Physical Layer Convergence Procedure

**IEEE** = Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství)

**CSMA/CA** = Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

**RTS/CTS** = Request to Send / Clear to Send

**Wi-Fi** = Wireless Fidelity

**Wi-Gig** = Wireless Gigabit Alliance

**SU-MIMO** = Single User Multiple input multiple output/ více vstupů více výstupů jednoho uživatele

**MU-MIMO** = Multi User Multiple input multiple output/ více vstupů více výstupů více uživatelů

**T** = transmitter neboli vysílač

**R** = receiver neboli přijímač

**S** = streams neboli toky

**N<sub>T</sub>** = number of transmitters neboli počet vysílacích antén

**N<sub>R</sub>** = number of receivers neboli počet přijímacích antén

**kB** = kilobyte, jednotka reprezentující velikost dat

**MB** = megabyte, jednotka reprezentující velikost dat

**Kbit/s** = kilobit za vteřinu, jednotka reprezentující počet přenesených kilobitů za vteřinu

**Mbit/s** = megabit za vteřinu, jednotka reprezentující počet přenesených megabitů za vteřinu



## 16 Seznam použité literatury

1. ŠIMEK, Martin a Michal PETROVIČ. Bezdrátové sítě. 1. V Plzni: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0225-0.
2. ZANDL, Patrick. *Bezdrátové sítě WiFi: praktický průvodce*. 1. Brno: Computer Press, 2003. ISBN 80-722-6632-2.
3. GAST, Matthew. *802.11ac: a survival guide*. 1. Beijing: O'Reilly, 2013. ISBN 978-1-449-34314-9.
4. PECHAČ, Pavel. *Modely šíření vln v zástavbě*. 1. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0186-1.
5. GAST, Matthew. *802.11n: a survival guide*. 1. Sebastopol, CA: O'Reilly, c2012. ISBN 978-1-449-31204-6.
6. ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2000, s. 75-255. ISBN 80-86056-47-3.

### 16.1 Dokumenty volně dostupné na internetu

7. HINTERSTEINER, Jason. A MU-MIMO Reality Check. *NetworkComputing* [online]. NetworkComputing, c, 7.7. 2016 [cit. 2018-06-24]. Dostupné z: <https://www.networkcomputing.com/wireless-infrastructure/mu-mimo-reality-check/1263574300>
8. RIIHIKALLIO, Petri. WiFi 5GHz band and wide channels. *Metis* [online]. Metis, c, 5.2.2018 [cit. 2018-06-25]. Dostupné z: <https://metis.fi/en/2018/02/5ghz-channels/>
9. MATHURANATHAN. MIMO – Diversity and Spatial Multiplexing. *Gaussianwaves* [online]. GaussianWaves, 2014 [cit. 2018-06-22]. Dostupné z: <https://www.gaussianwaves.com/2014/08/mimo-diversity-and-spatial-multiplexing/>
10. OTÝPKA, M. Coptel. Modulace OFDM. [online]. © 2010 [cit. 2018-06-30]. Dostupné z: [coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=7982](http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=7982)
11. POOLE, Ian. IEEE 802.11n Standard. *Radio Electronics* [online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11n.php>
12. POOLE, Ian. IEEE 802.11ac Gigabit Wi-Fi. *Radio Electronics* [online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11ac-gigabit.php>
13. POOLE, Ian. OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing Tutorial. *Radio Electronics* [online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/ofdm/ofdm-basics-tutorial.php>
14. POOLE, Ian. Wi-Fi / WLAN Channels, Frequencies, Bands & Bandwidths. *Radio Electronics* [online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/80211-channels-number-frequencies-bandwidth.php>

15. POOLE, Ian. IEEE 802.11ad Microwave Wi-Fi / WiGig Tutorial. *Radio Electronics* [online]. [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11ad-microwave.php>
16. MIMO. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/MIMO>
17. List of WLAN channels. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-07-01]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_WLAN\\_channels](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_WLAN_channels)
18. IEEE 802.11. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-07-03]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.11](https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11)
19. DLABAČ, Petr. Šíření radiových vln u bezdrátových systémů [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015 [cit. 2018-07-09]. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/33996/dlaba%20\\_2015\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/33996/dlaba%20_2015_dp.pdf?sequence=1). Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
20. KEIM, Robert. Understanding Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Modulation. *All about circuits* [online]. EETech Media, 2016 [cit. 2018-11-21]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/quadrature-phase-shift-keying-qpsk-modulation/>
21. *All about circuits* [online]. Spojené státy americké: EETech Media, c2018 [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/>
22. WIRELESS NETWORKING IN THE DEVELOPING WORLD. *Wikipedia* [online]. [cit. 16.1.2019]. Dostupný na WWW: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2.4\\_GHz\\_Wi-Fi\\_channels\\_\(802.11b,g\\_WLAN\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2.4_GHz_Wi-Fi_channels_(802.11b,g_WLAN).png)
23. Decibel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Decibel>
24. CORSON, Jackson. Wireless Reliability - Channel Bounding. *InterOperability Laboratory* [online]. Durham: University of New Hampshire InterOperability Laboratory, c2019, 4.6.2014 [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <https://www.iol.unh.edu/blog/2014/06/04/wireless-reliability-channel-bounding>
25. SYSADMIN1138 a Michael HAMPTON. Is IPv6 'faster' than IPv4?. In: *Stack Exchange: Superuser* [online]. Stack Exchange, 2019, 2010 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://superuser.com/questions/181601/is-ipv6-faster-than-ipv4>
26. WRITER, Staff. IPv4 vs IPv6 – Performance comparison. In: *Mybroadband* [online]. MyBroadband, 2019, 2016 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://mybroadband.co.za/news/internet/187975-ipv4-vs-ipv6-performance-comparison.html>

## 16.2 Odborné články

27. PERAHIA, Eldad, Carlos CORDEIRO, Minyoung PARK a L. Lily YANG. IEEE 802.11ad: Defining the Next Generation Multi-Gbps Wi-Fi. *2010 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference* [online]. IEEE, 2010, 2010, 1-5 [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1109/CCNC.2010.5421713. ISBN 978-1-4244-5175-3. ISSN 2331-9860. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5421713/>
28. BELLALTA, Boris, Jaume BARCELO, Dirk STAEHLE, Alexey VINEL a Miquel OLIVER. On the Performance of Packet Aggregation in IEEE 802.11ac MU-MIMO WLANs. *IEEE Communications Letters* [online]. 2012, **16**(10), 1588-1591 [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1109/LCOMM.2012.081612.120744. ISSN 1089-7798. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6287486/>
29. PARK, Minyoung. IEEE 802.11ac: Dynamic Bandwidth Channel Access. *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)* [online]. IEEE, 2011, 2011, , 1-5 [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1109/icc.2011.5963089. ISBN 978-1-61284-232-5. ISSN 1550-3607. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5963089/>
30. PERAHIA, Eldad a Michelle X. GONG. Gigabit wireless LANs. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* [online]. 2011, **15**(3), 23- [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1145/2073290.2073294. ISSN 15591662. Dostupné z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2073290.2073294>
31. BEJARANO, Oscar, Edward KNIGHTLY a Minyoung PARK. IEEE 802.11ac: from channelization to multi-user MIMO. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2013, **51**(10), 84-90 [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6619570. ISSN 0163-6804. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6619570/>
32. ENG HWEE ONG, Jarkko KNECKT, Olli ALANEN, Zheng CHANG, Toni HUOVINEN a Timo NIHTILA. IEEE 802.11ac: Enhancements for very high throughput WLANs. *2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* [online]. IEEE, 2011, 2011, , 849-853 [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1109/PIMRC.2011.6140087. ISBN 978-1-4577-1348-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6140087/>
33. CROW, B.P., I. WIDJAJA, J.G. KIM a P.T. SAKAI. IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. *IEEE Communications Magazine* [online]. 1997, **35**(9), 116-126 [cit. 2018-07-03]. DOI: 10.1109/35.620533. ISSN 0163-6804. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/620533/>

## 17 Seznam obrázků, tabulek a grafů

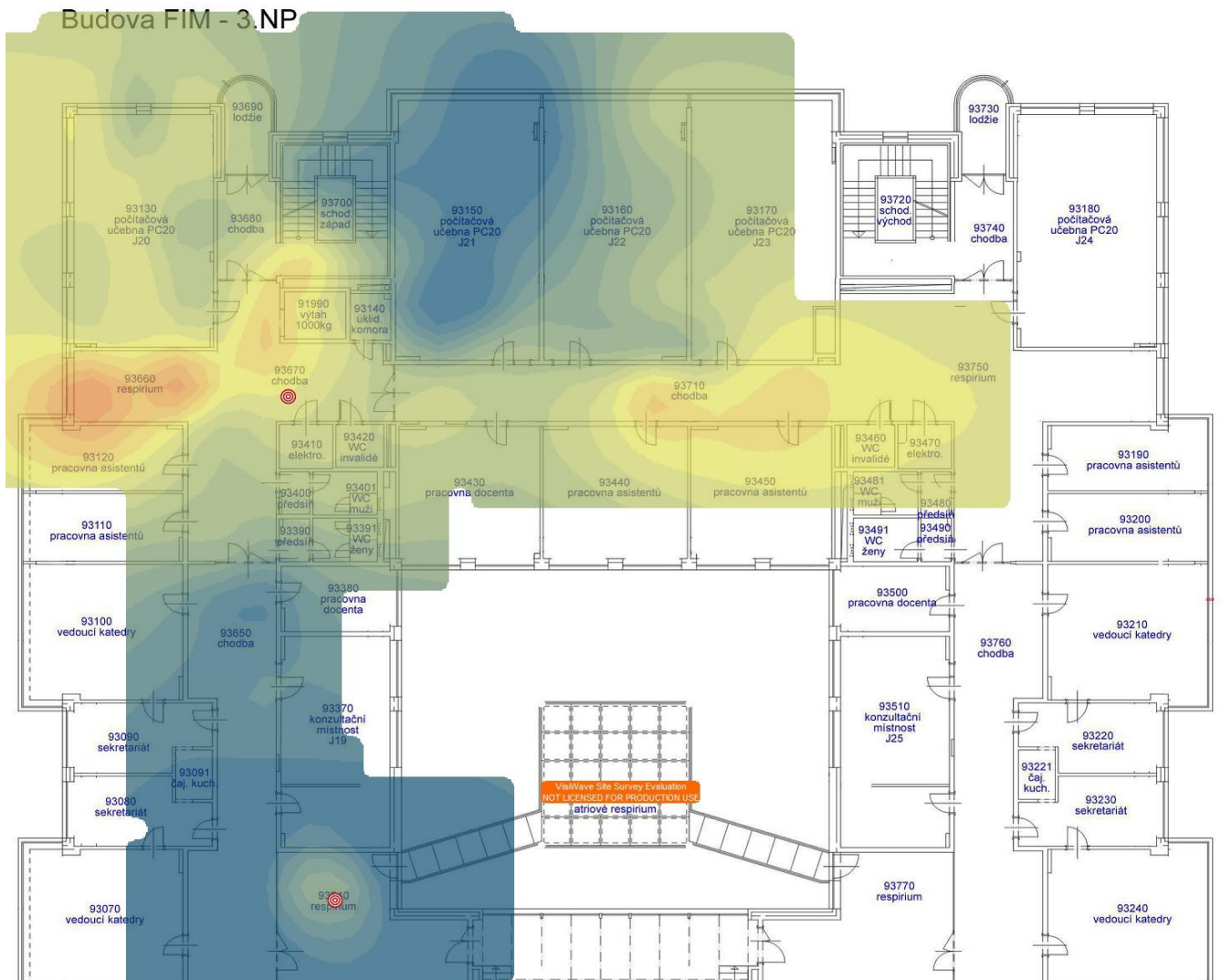
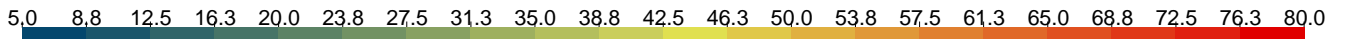
Tabulka 1 Technické parametry stanic převzato z VO-R/12/09.2010-12 .....	7
Tabulka 2 Porovnání pásma 2,4GHz a 5GHz .....	11
Tabulka 3 Kanály pro 5GHz převzato Poole nedatováno .....	12
Tabulka 4 IEEE 802.11n shrnutí .....	17
Tabulka 5 IEEE 802.1ac shrnutí .....	22
Tabulka 6 IEEE 802.11ad shrnutí .....	25
Tabulka 7 Legenda pro měření 20MHz přenosové rychlosti pomocí VisiWave .....	51
Tabulka 8 Legenda pro měření 40MHz přenosové rychlosti pomocí VisiWave .....	56
Tabulka 9 Legenda pro měření 80MHz přenosové rychlosti pomocí VisiWave .....	61
Graf 1 Rychlosti pro přenos dat 1 kB.....	37
Graf 2 Rychlosti pro přenos dat 1 MB .....	38
Graf 3 Rychlosti pro přenos velkoobjemových dat.....	39
Graf 4 Rychlosti pro přenos dat v pásmu 2,4GHz .....	40
Obrázek 1 Vrstvový model sítě IEEE 802.11 převzato z Šimeček Petrovič 2013.....	3
Obrázek 2 Ad-hoc síť .....	8
Obrázek 3 Infrastrukturní síť.....	9
Obrázek 4 Kanály v pásmu 2,4GHz (převzato z WIRELESS NETWORKING IN THE DEVELOPING WORLD 2007).....	10
Obrázek 5 Kanály v pásmu 5 GHz (převzato z Corson nedatováno).....	11
Obrázek 6 Mapování bitů pro 16-QAM.....	15
Obrázek 7 Asymetrie u beamformingu (převzato z Gast 2012).....	20
Obrázek 8 Přehled šířek kanálů v 5GHz (převzato z Berajano 2013).....	22
Obrázek 9 Heatmapa pro 802.11ac/20MHz třetího podlaží .....	28
Obrázek 10 Heatmapa pro 802.11ac/40MHz třetího podlaží .....	29
Obrázek 11 Heatmapa pro 802.11ac/80MHz třetího podlaží .....	30
Obrázek 12 Heatmapa pro 802.11n/40MHz třetího podlaží .....	31
Obrázek 13 Pozice měření.....	32

## 18 Přílohy

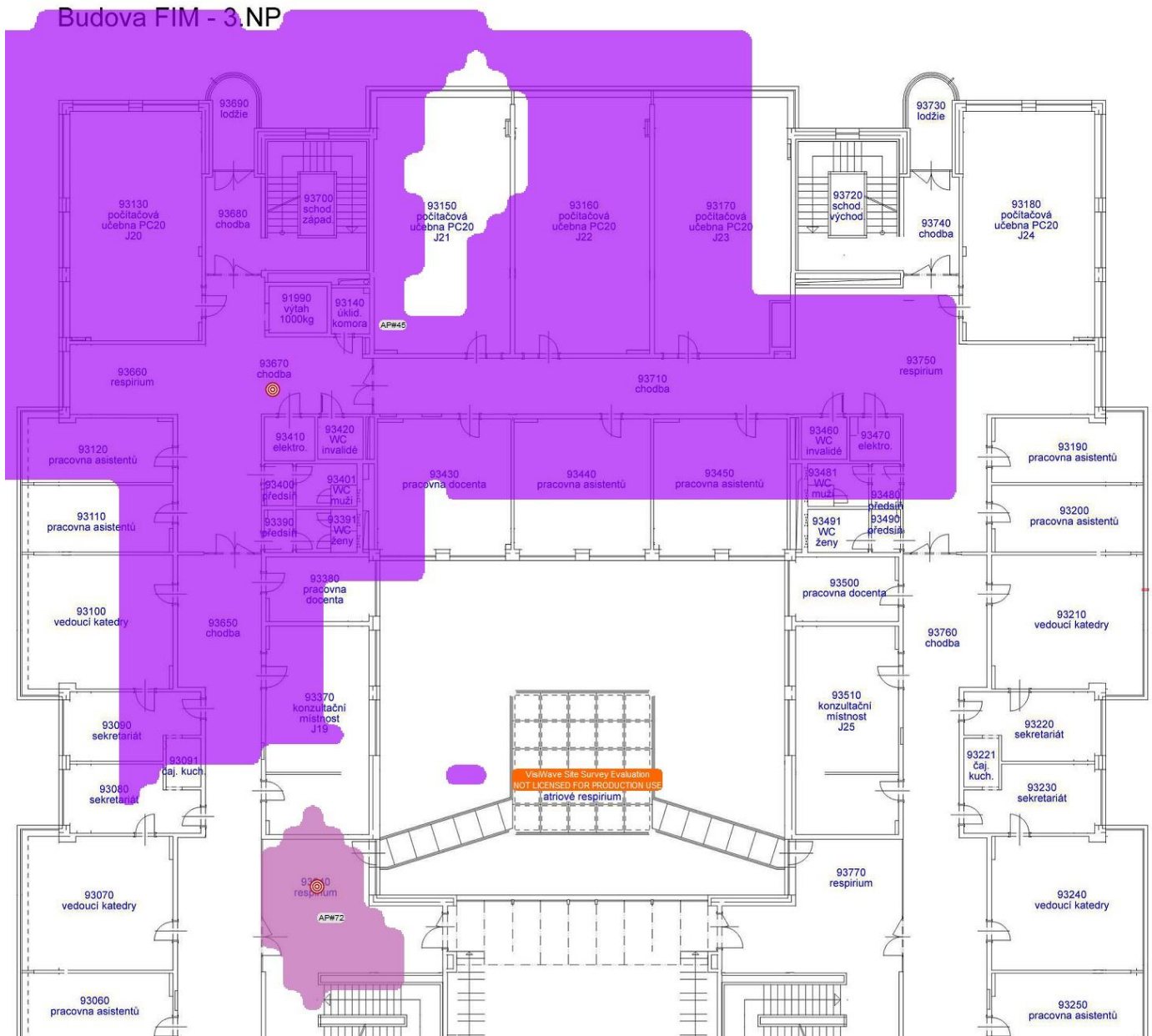
### 18.1 Příloha č.1 Výsledky z programu VisiWave pro 20MHz 5GHz pásma

Survey Information	
Number of Wi-Fi Data Points	64
Number of Data Points (Associated)	64
Number of Spectrum Data Points	0
Wireless Adapters Used (% of Wi-Fi Data Points)	Intel(R) Dual Band Wireless-AC 7260 (100.0%)
Number of AP Readings Taken	64
Ave Number of APs Seen at each Point	1.0
Channels Seen (% of AP Readings)	0 (1.6%), 48 (98.4%)
Data Rates Seen (% of AP Readings)	20Mbps (1.6%), 22Mbps (7.8%), 24Mbps (1.6%), 26Mbps (4.7%), 29Mbps (3.1%), 39Mbps (1.6%), 43Mbps (1.6%), 52Mbps (3.1%), 58Mbps (1.6%), 65Mbps (3.1%), 72Mbps (9.4%), 78Mbps (1.6%), 87Mbps (59.4%)
Security Modes Seen (% of AP Readings)	WPA2 (100.0%)
Confidence Radius	5 m
Number of SSIDs Discovered	15
Number of APs Discovered	107
Total Number of Points (Ignores AP Filter)	65
Survey Trail Length	0 m
Distance Between All Data Points	133 m
Ave Distance Between Data Points	2.04 m
Total Survey Area	1297 sq m
Lat/Long of Survey Area Center	
Percentage of Survey Map Covered	29.4%

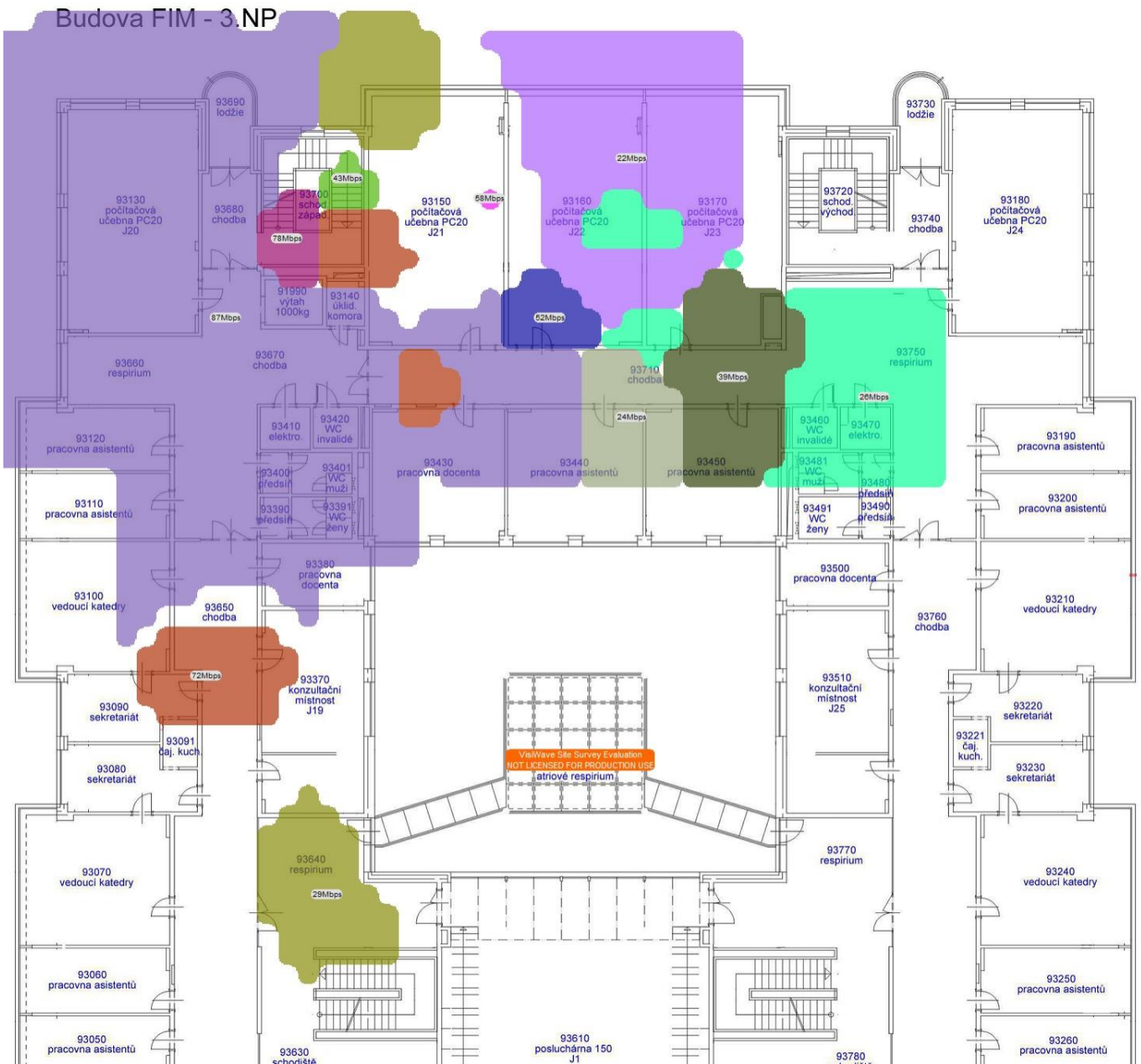
# Heatmap:



## AP Pokrytí (Nejsilnější):



## Mapa rychlosti přenosu dat:



	87Mbps		39Mbps
	78Mbps		29Mbps
	72Mbps		26Mbps
	52Mbps		24Mbps
	43Mbps		22Mbps

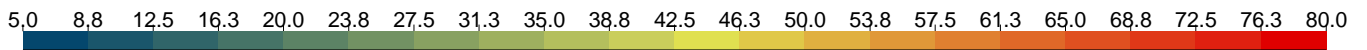
Tabulka 7 Legenda pro měření 20MHz přenosové rychlosti pomocí VisiWave



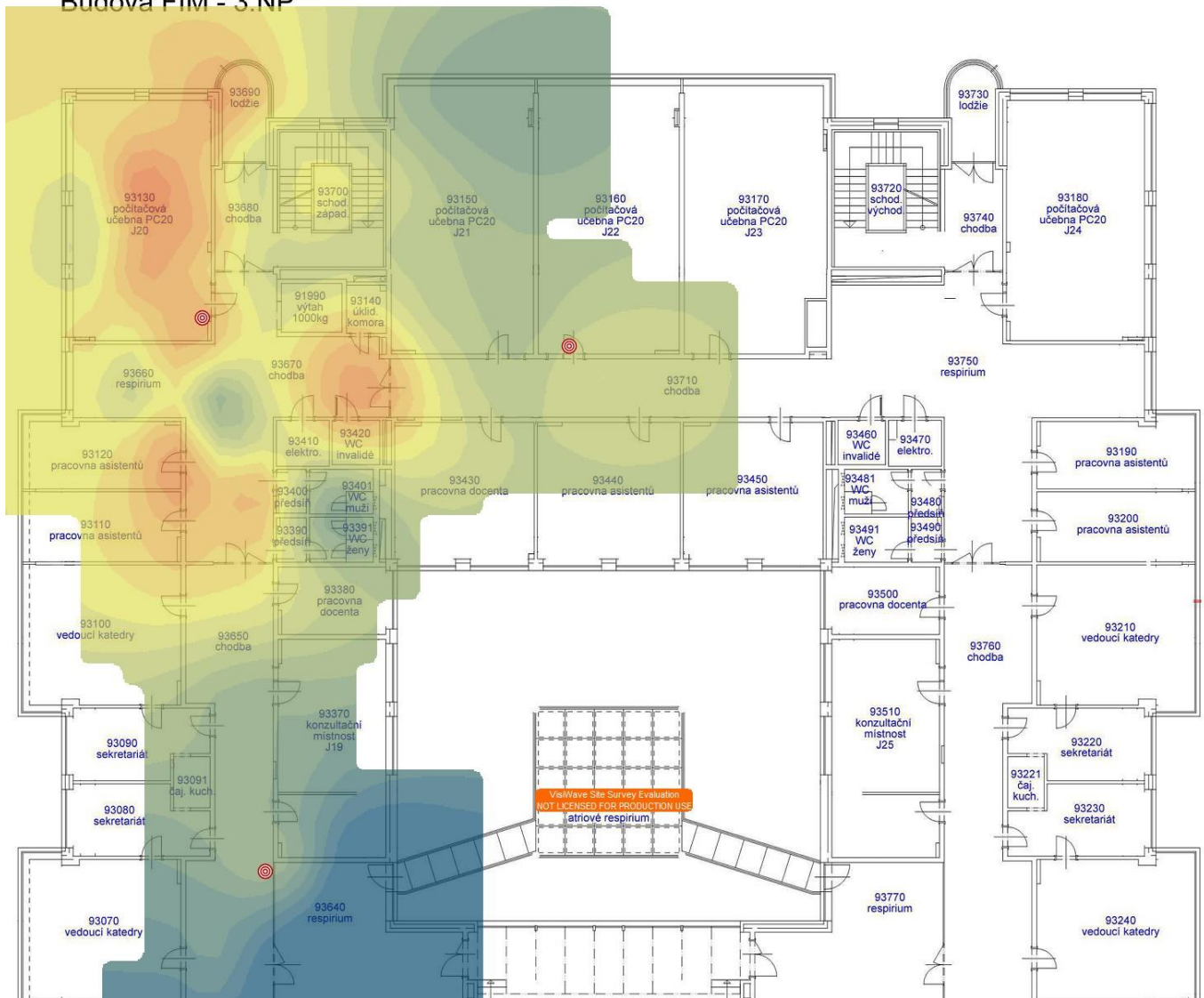
## 18.2 Příloha č.2 Výsledky z programu VisiWave pro 40MHz 5GHz pásma

Survey Information	
Number of Wi-Fi Data Points	51
Number of Data Points (Associated)	51
Number of Spectrum Data Points	0
Wireless Adapters Used (% of Wi-Fi Data Points)	Intel(R) Dual Band Wireless-AC 7260 (100.0%)
Number of AP Readings Taken	51
Ave Number of APs Seen at each Point	1.0
Channels Seen (% of AP Readings)	44 (13.7%), 149 (86.3%)
Data Rates Seen (% of AP Readings)	9Mbps (5.9%), 27Mbps (2.0%), 54Mbps (5.9%), 60Mbps (2.0%), 81Mbps (2.0%), 90Mbps (5.9%), 108Mbps (2.0%), 122Mbps (2.0%), 135Mbps (9.8%), 150Mbps (9.8%), 162Mbps (3.9%), 200Mbps (49.0%)
Security Modes Seen (% of AP Readings)	WPA2 (100.0%)
Confidence Radius	5 m
Number of SSIDs Discovered	14
Number of APs Discovered	115
Total Number of Points (Ignores AP Filter)	55
Survey Trail Length	0 m
Distance Between All Data Points	128 m
Ave Distance Between Data Points	2.33 m
Total Survey Area	1317 sq m
Lat/Long of Survey Area Center	
Percentage of Survey Map Covered	29.4%

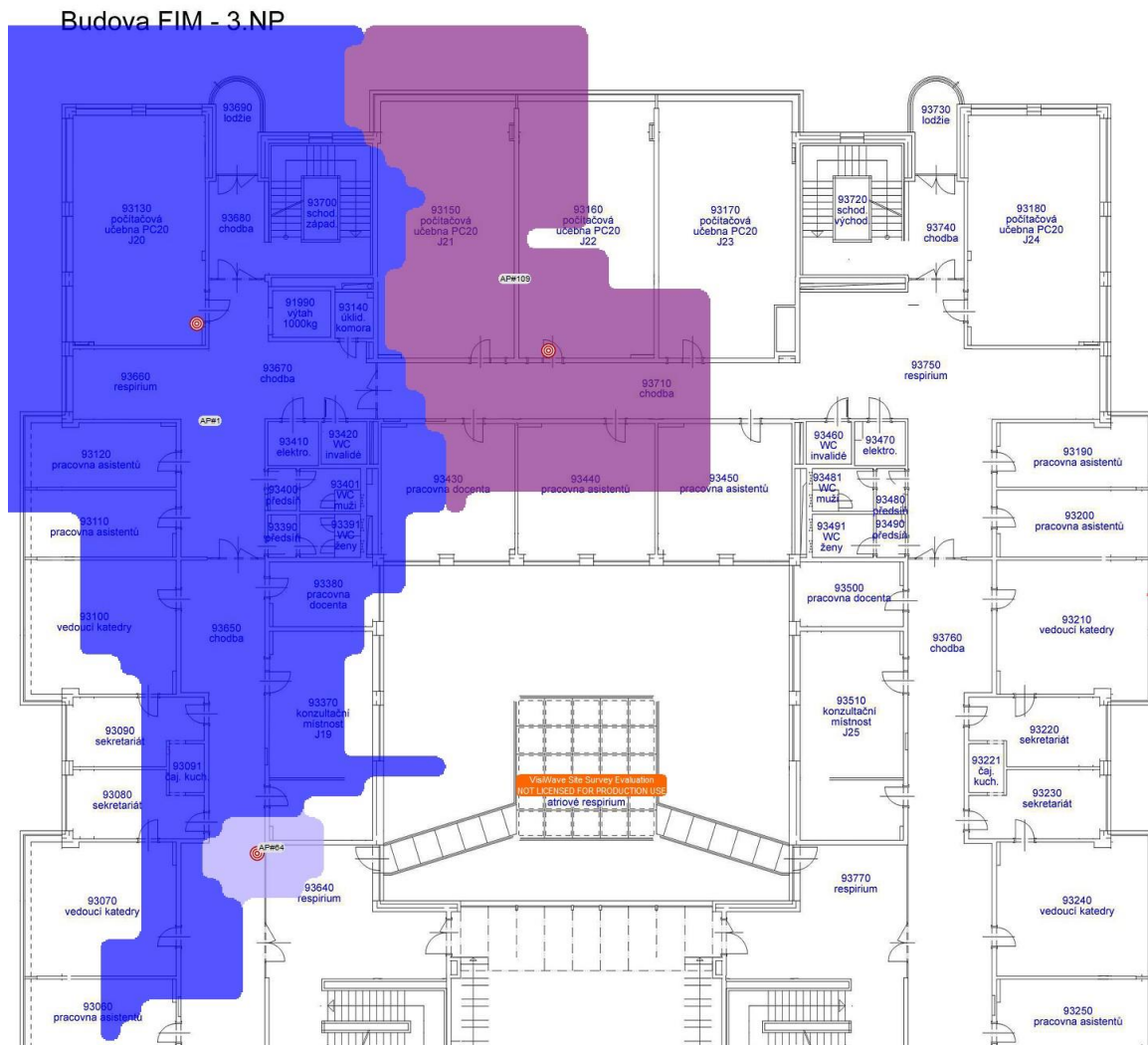
# Heatmap:



Budova FIM - 3.NP

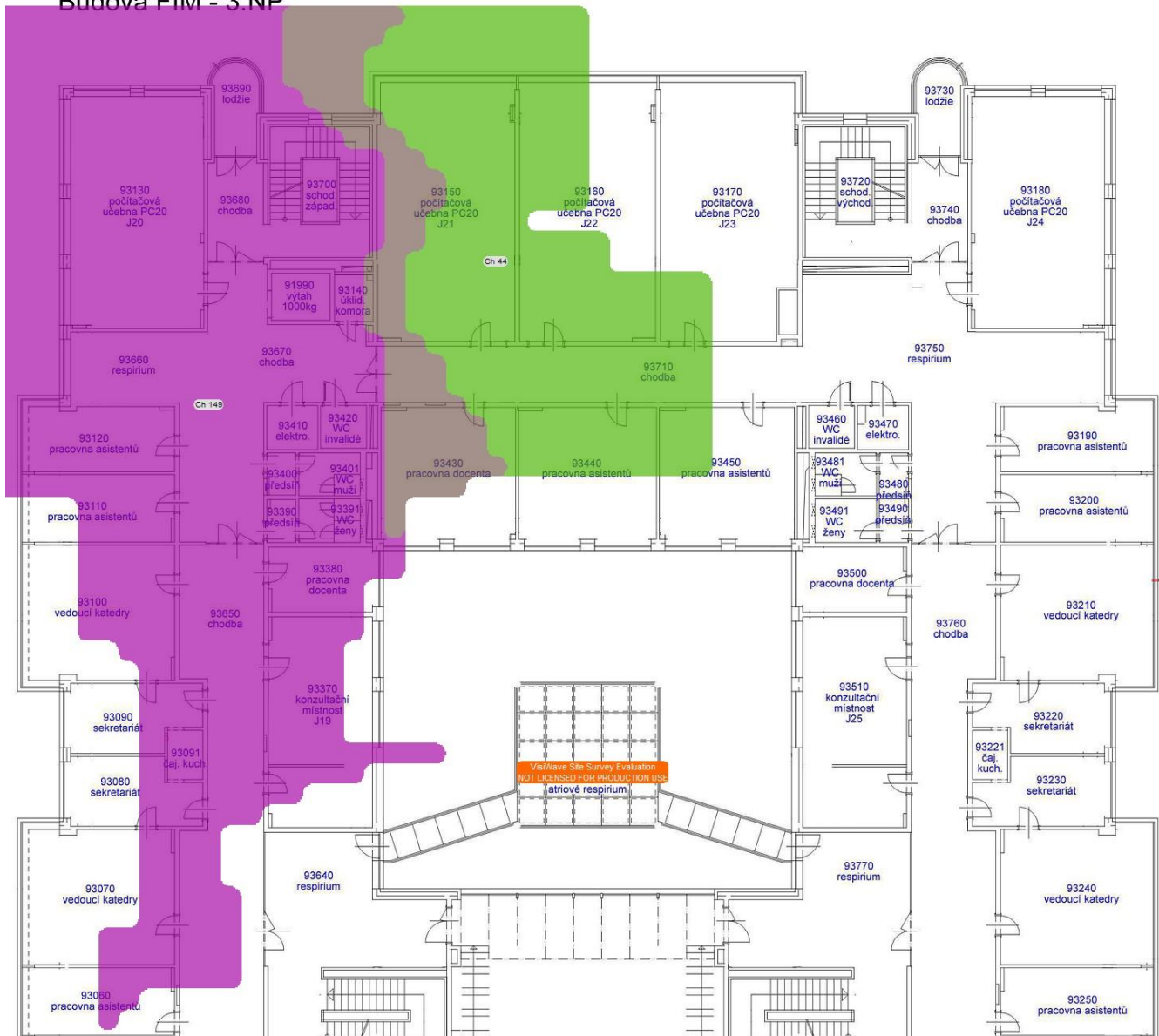


## AP Pokrytí (Nejsilnější):

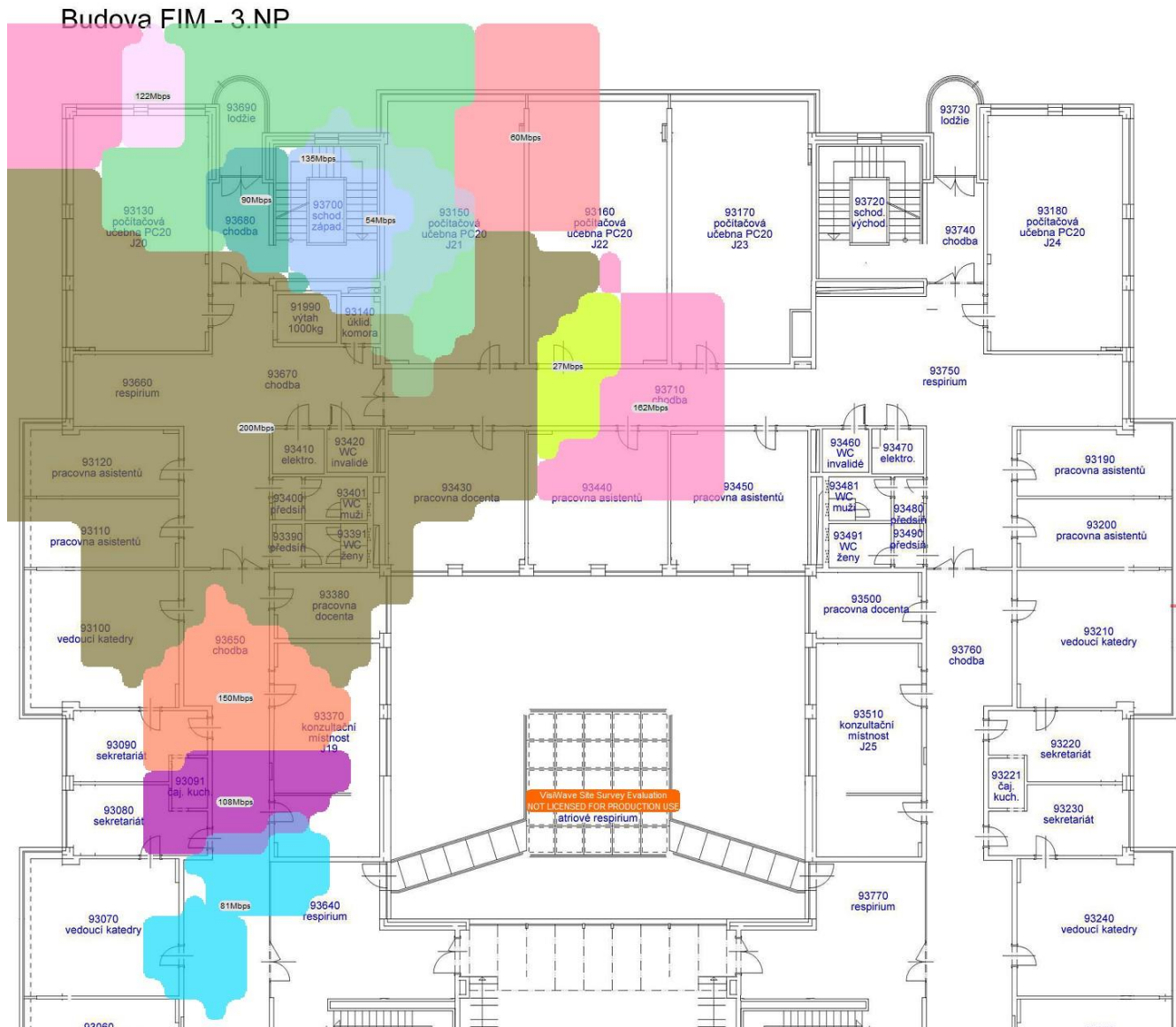


# Mapa Wifi kanálů

Budova FIM - 3.NP



## Mapa rychlosti přenosu dat:



Tabulka 8 Legenda pro měření 40MHz přenosové rychlosti pomocí VisiWave

### 18.3 Příloha č.3 Výsledky z programu VisiWave pro 80MHz 5GHz pásma

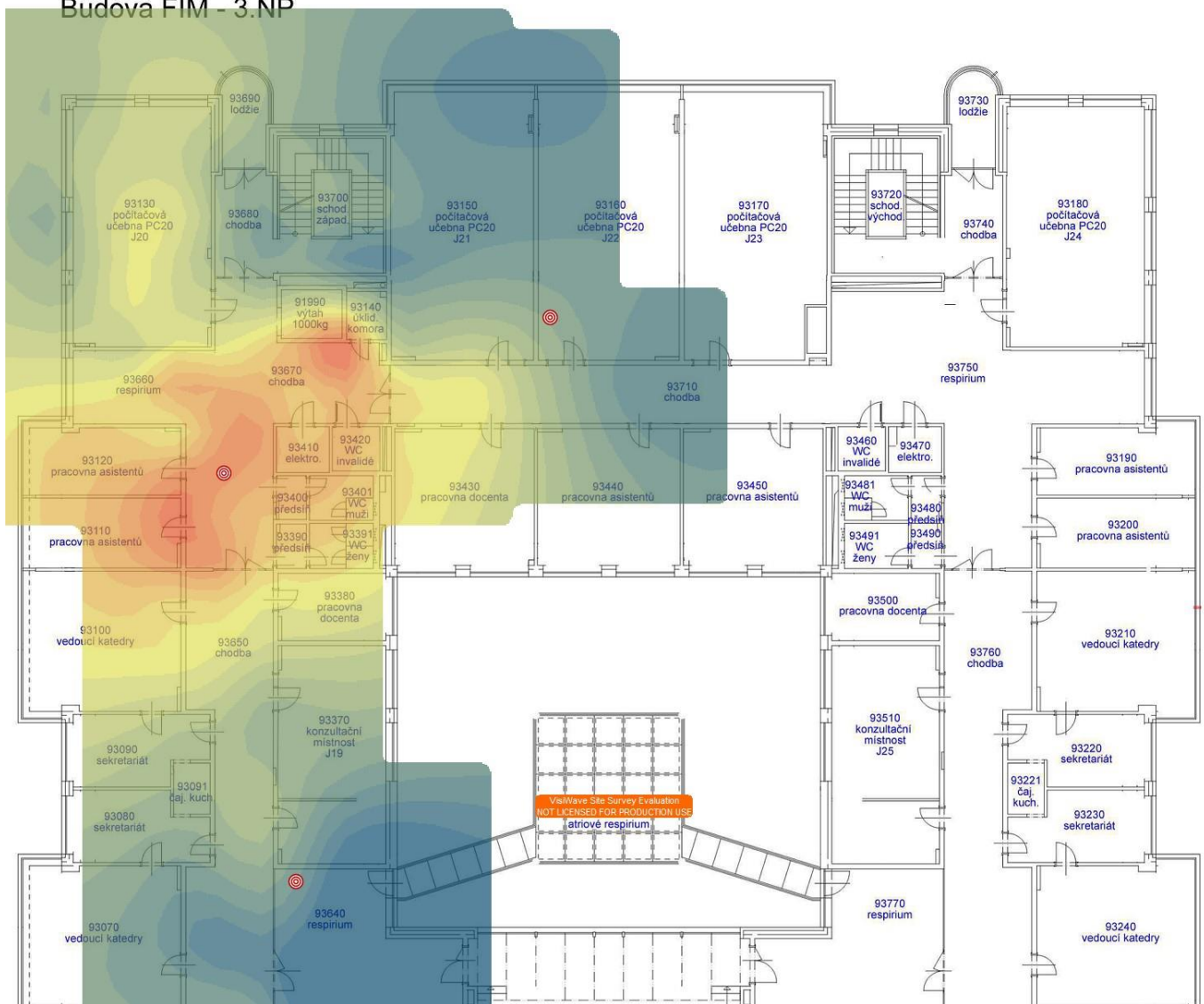
Survey Information	
Number of Wi-Fi Data Points	98
Number of Data Points (Associated)	98
Number of Spectrum Data Points	0
Wireless Adapters Used (% of Wi-Fi Data Points)	Intel(R) Dual Band Wireless-AC 7260 (100.0%)
Number of AP Readings Taken	98
Ave Number of APs Seen at each Point	1.0
Channels Seen (% of AP Readings)	0 (1.0%), 36 (8.2%), 149 (90.8%)
Data Rates Seen (% of AP Readings)	6Mbps (5.1%), 9Mbps (1.0%), 18Mbps (1.0%), 29Mbps (5.1%), 59Mbps (19.4%), 65Mbps (4.1%), 88Mbps (3.1%), 117Mbps (2.0%), 130Mbps (1.0%), 176Mbps (3.1%), 234Mbps (1.0%), 260Mbps (4.1%), 263Mbps (1.0%), 325Mbps (2.0%), 351Mbps (3.1%), 390Mbps (7.1%), 433Mbps (36.7%)
Security Modes Seen (% of AP Readings)	WPA2 (100.0%)
Confidence Radius	5 m
Number of SSIDs Discovered	18
Number of APs Discovered	130
Total Number of Points (Ignores AP Filter)	101
Survey Trail Length	0 m
Distance Between All Data Points	159 m
Ave Distance Between Data Points	1.58 m
Total Survey Area	1377 sq m
Lat/Long of Survey Area Center	
Percentage of Survey Map Covered	31.7%



# Heatmap

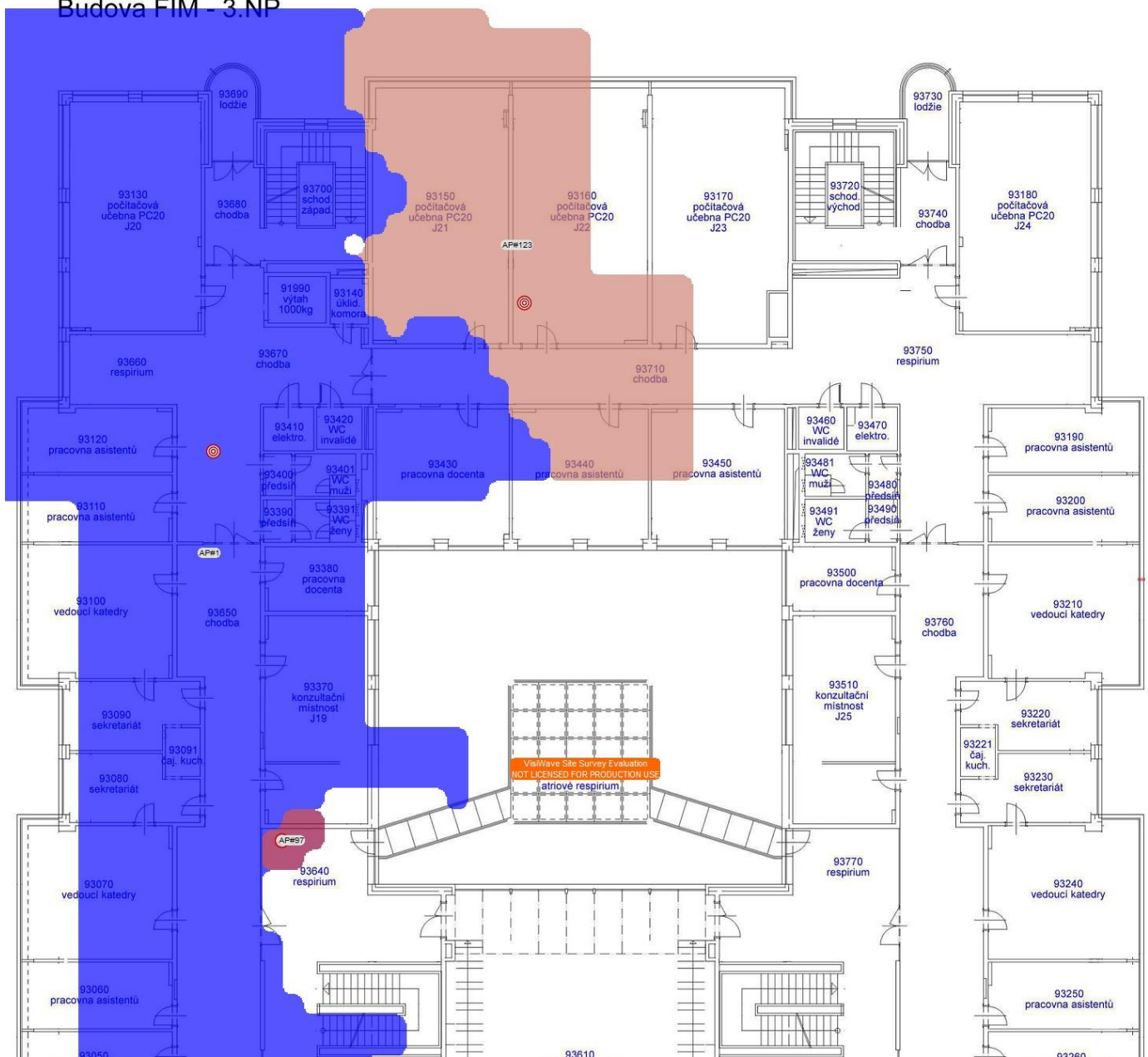
23.8 27.5 31.3 35.0 38.8 42.5 46.3 50.0 53.8 57.5 61.3 65.0 68.8 72.5 76.3 80.0

Budova FIM - 3.NP



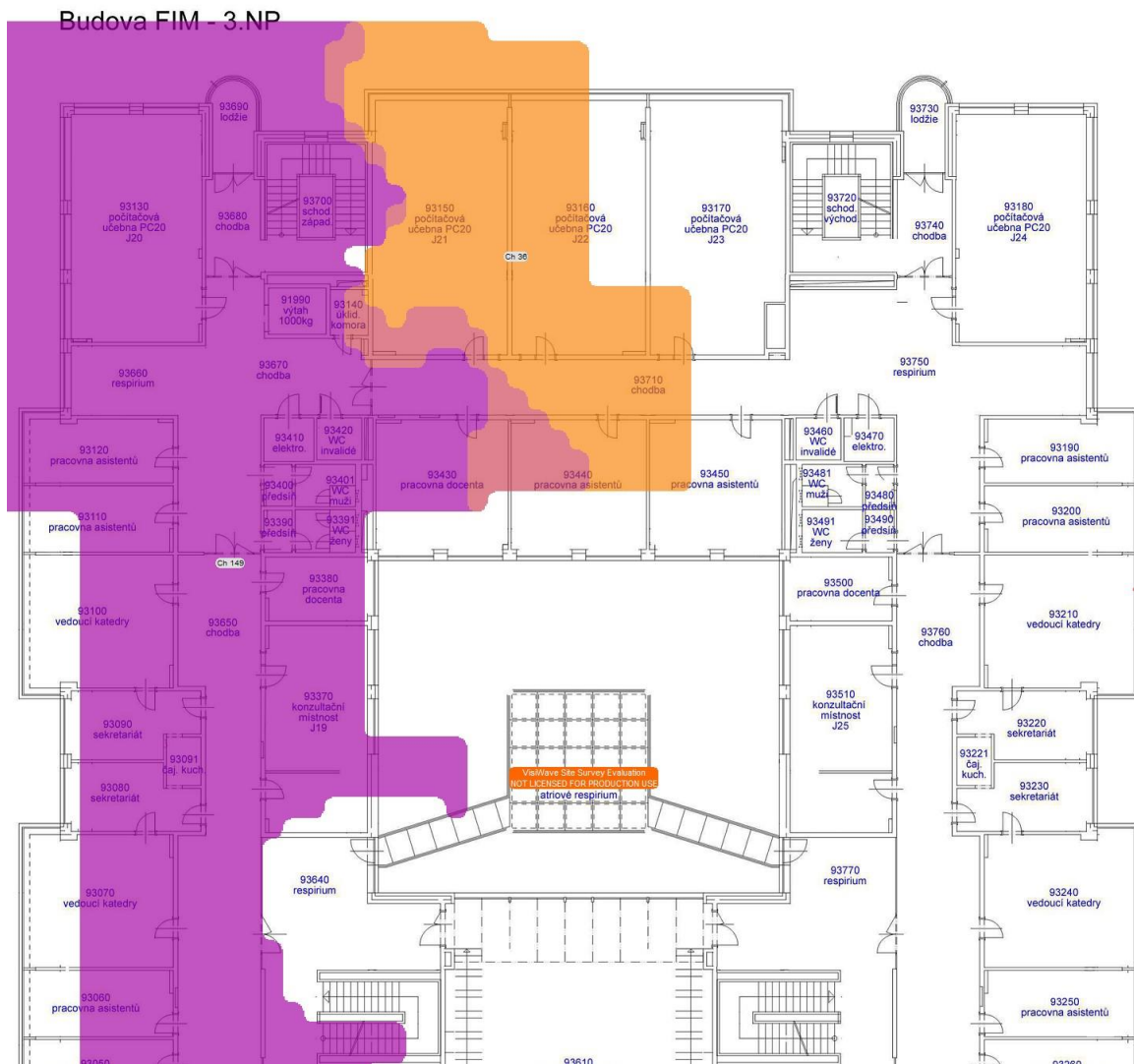
## AP Pokrytí (Nejsilnější):

Budova FIM - 3.NP

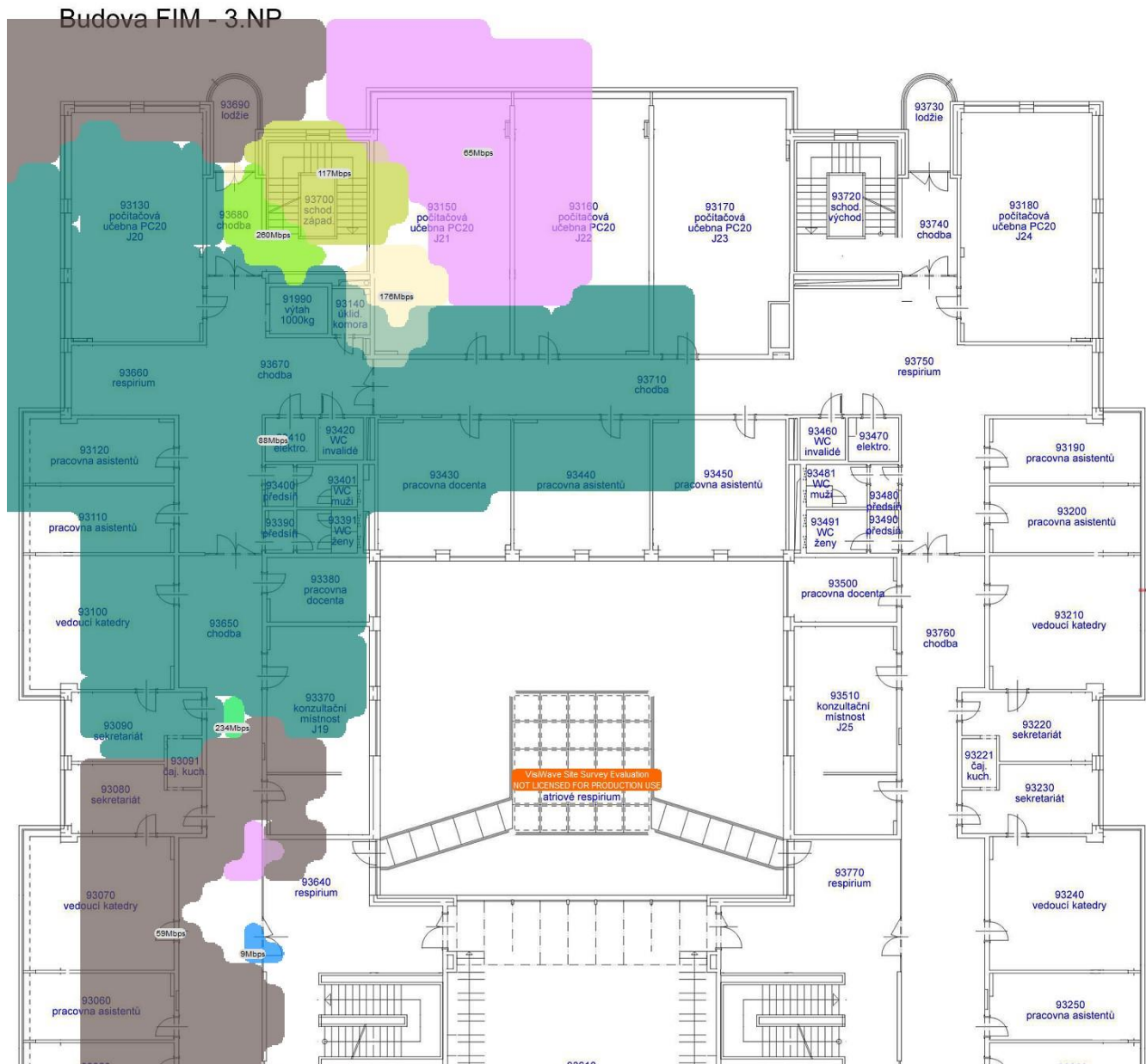




# Mapa Wifi kanálů



## Mapa rychlosti přenosu dat:



	260Mbps		65Mbps
	234Mbps		59Mbps
	176Mbps		9Mbps
	117Mbps		6Mbps
	88Mbps		

Tabulka 9 Legenda pro měření 80MHz přenosové rychlosti pomocí VisiWave

**Podklad pro zadání BAKALÁŘSKÉ práce studenta**

<b>PŘEDKLÁDÁ:</b>	<b>ADRESA</b>	<b>OSOBNÍ ČÍSLO</b>
Horáček Jan	Hradecká 1688, Hradec Králové - Nový Hradec Králové	I1600538

**TÉMA ČESKY:**

Analýzu vlivu reálného přenosového prostředí na šíření signálu Wifi

**TÉMA ANGLICKY:**

The analysis of the influence of transmission areas on the Wi-Fi signal spreading

**VEDOUCÍ PRÁCE:**

Mgr. Josef Horálek, Ph.D. - KIT

**ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je navrhnout a realizovat praktická měření pro analýzu vlivu reálného přenosového prostředí na šíření signálu za využití pásma 2,4 GHz a 5GHz.

V teoretické části autor představí principy Wifi sítí, šíření signálu s důrazem na standard IEEE 802.11n a IEEE 802.11ac. V praktické části autor navrhne a realizuje minimálně tři úlohy, pro ověření vlivu reálného přenosového prostředí na výkon a rychlost přenosu dat v závislosti na vzdálenosti, počtu a typu překážek.

**SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:**

ZANDL, Patrick. Bezdrátové sítě WiFi: praktický průvodce. Brno: Computer Press, 2003. ISBN 9788072266326.

GAST, Matthew S. 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide : Enabling Mobility with Wi-Fi Networks. 3. Sebastopol, United States: O'Reilly Media, Inc, USA, 2018. ISBN 9781491963548.

Podpis studenta: .....

Datum: .....

Podpis vedoucího práce: .....

Datum: .....