INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY

Zakład Systemów i Sieci Bezprzewodowych w Gdańsku (Z-8)

Zakład Analiz i Rozwoju Rynku ICT (Z-2)

Analiza wykonalności wdrożenia usług w technologii 5G przy obecnych oraz zwiększonych normach dopuszczalnych poziomów promieniowania elektromagnetycznego

Zadanie A: Stworzenie modelu „zapotrzebowanie-podaż” w zakresie usługi transmisji danych dla obszaru Polski oraz wskazanie głównych barier i potrzeb rozwojowych co najmniej do roku 2025

Praca nr Z-8/08400018

Praca nr Z-2/02400018.01

Instytut Łączności, czerwiec 2018

Analiza wykonalności wdrożenia usług w technologii 5G przy obecnych oraz zwiększonych normach dopuszczalnych poziomów promieniowania elektromagnetycznego

Zadanie A: Stworzenie modelu „zapotrzebowanie-podaż” w zakresie usługi transmisji danych dla obszaru Polski oraz wskazanie głównych barier i potrzeb rozwojowych co najmniej do roku 2025

Praca nr: Z-8/08400018
Z-2/02400018.01

Kierownik pracy: dr inż. Krzysztof Bronk

Wykonawcy pracy:

Z-8:
dr inż. Krzysztof Bronk
dr inż. Adam Lipka
dr inż. Rafał Niski

Z-2:
dr Magdalena Olender-Skorek
mgr inż. Andrzej Piekut
dr Marek Sylwestrzak

Kierownik Zakładu Z-8: dr inż. Krzysztof Bronk

Kierownik Zakładu Z-2: dr Magdalena Olender-Skorek

© Copyright by Instytut Łączności, 2018

Niniejszy Raport może być powielany i publikowany wyłącznie w całości.

Publikacja fragmentów wymaga uzyskania zgody Instytutu Łączności.

Spis treści

1. Wprowadzenie 5
2. Model prognozy zapotrzebowania na usługi transmisji danych 6
2.1. Metodyka wyznaczania parametrów do modelu 6
2.2. Metodyka dopasowania parametrów do poszczególnych obszarów 7
2.3. Analiza wpływu liczby urządzeń na wzrost zapotrzebowania 8
2.4. Wyniki modelowania wzrostu zapotrzebowania 9
3. Model weryfikujący maksymalne pojemności sieci 3G/4G/5G 16
3.1. Zakładka Info 16
3.2. Zakładka Bilans łącza radiowego 16
3.3. Zakładka Konfiguracja sektora 19
3.4. Zakładka Dane GUS 20
3.5. Zakładka Bilans pojemności 21
4. Wyniki analizy pojemnościowej 25
4.1. Założenia wstępne 25
4.2. Analiza uwzględniająca utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości 30
4.2.1. Polska – przypadek ogólny 32
4.2.2. Warszawa 34
4.2.3. Kraków 36
4.2.4. Łódź 38
4.2.5. Wrocław 40
4.2.6. Gdańsk 42
4.2.7. Poznań 44
4.2.8. Bydgoszcz 46
4.2.9. Katowice 48
4.3. Analiza uwzględniająca dołożenie warstwy nośnej 700 MHz 50
4.3.1. Polska – przypadek ogólny 51
4.3.2. Warszawa 52
4.3.3. Kraków 53
4.3.4. Łódź 54
4.3.5. Wrocław 55
4.3.6. Gdańsk 56
4.3.7. Poznań 57

4.3.8. Bydgoszcz 58
4.3.9. Katowice 59
4.4. Analiza uwzględniająca dołożenie warstw nośnych 700 MHz, 2.6 GHz, 3.4-3.8 GHz 60
4.4.1. Polska – przypadek ogólny 61
4.4.2. Warszawa 63
4.4.3. Kraków 65
4.4.4. Łódź 67
4.4.5. Wrocław 69
4.4.6. Gdańsk 71
4.4.7. Poznań 73
4.4.8. Bydgoszcz 75
4.4.9. Katowice 77
4.5. Analiza uwzględniająca budowę sieci mikro- oraz piko-komórek 79
4.5.1. Polska – przypadek ogólny 80
4.5.2. Warszawa 82
4.5.3. Kraków 84
4.5.4. Łódź 86
4.5.5. Wrocław 88
4.5.6. Gdańsk 90
4.5.7. Poznań 92
4.5.8. Bydgoszcz 94
4.5.9. Katowice 96
5. Podsumowanie 98
Literatura 105
Załączniki 107

1. Wprowadzenie

Niniejszy raport został przygotowany na zlecenie Polskiej Izby Informatyki i Telekomunikacji PIIT, w ramach Zlecenia nr 1 do Umowy Ramowej zawartej w dniu 19 grudnia 2017r. pt. ***Analiza wykonalności wdrożenia usług w technologii 5G przy obecnych oraz zwiększonych normach dopuszczalnych poziomów promieniowania elektromagnetycznego***.

Celem analizy jest zdiagnozowanie ewentualnych ograniczeń we wdrożeniu sieci radiowych w technologiach 4G oraz 5G w Polsce, ze szczególnym zwróceniem uwagi na tereny miejskie o gęstej zabudowie oraz wysokiej gęstości zaludnienia. Analiza uwzględnia charakterystykę rynku polskiego w tym liczbę operatorów bezprzewodowych sieci komórkowych, potencjalnie dostępne pasma częstotliwości (700 MHz, 2.6 GHz, 3.4-3.8 GHz), charakterystykę typowych obszarów wielkomiejskich oraz obszarów podmiejskich i wiejskich.

Niniejszy raport prezentuje wyniki ***Zadania A: Stworzenie modelu „zapotrzebowanie-podaż" w zakresie usług transmisji danych dla obszaru Polski oraz wskazanie głównych barier i potrzeb rozwojowych w perspektywie co najmniej do roku 2025***.

W ramach zadania zostały stworzony model spodziewanej ewolucji zapotrzebowania na usługi transmisji danych w czterech typach obszarowych, reprezentatywnych dla terenu Polski pod względem gęstości zaludnienia i zabudowy: wielkomiejskim, miejskim, podmiejskim oraz wiejskim. Model został oparty na danych dostępnych z różnych opracowań (np. Cisco, Ericsson) oraz na danych udostępnionych przez krajowych operatorów telefonii komórkowej. Prognoza modelu obejmuje okres do 2025 roku.

Opracowano także model weryfikujący maksymalne pojemności obecnych sieci 3G/LTE w zakresie transmisji danych w czterech typach obszarowych, reprezentatywnych dla terenu Polski pod względem gęstości zaludnienia i zabudowy: wielkomiejskim, miejskim, podmiejskim oraz wiejskim. Model ten oparty został na dostępnej wiedzy technicznej oraz na danych udostępnionych przez krajowych operatorów telefonii komórkowej.

Na podstawie opracowanych modeli, określono kiedy poziom zapotrzebowania na usługi transmisji danych przekroczy potencjalne pojemności sieci w poszczególnych typach obszarów.

Przeprowadzono również analizę dotyczącą wymaganej rozbudowy przyszłej sieci, która zapewni pokrycie popytu na usługi transmisji danych w perspektywie do roku 2025 w poszczególnych typach obszarów, przy uwzględnieniu ograniczeń praktycznych. Prognoza obejmuje następujące scenariusze: (a) utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, (b) dołożenie warstwy nośnej 700MHz, (c) dołożenie potencjalnych warstw nośnych (700 MHz, 2.6 GHz, 3.4-3.8 GHz) oraz (d) umożliwienie budowy mikro- oraz piko-komórek. W przeprowadzonej analizie założono także, że wspomniane zasoby częstotliwościowe będą dostępne już od 2019 roku.

2. Model prognozy zapotrzebowania na usługi transmisji danych

W ramach modelu ewolucji zapotrzebowania na usługi transmisji danych w czterech typach obszarów (wielkomiejskim, miejskim, podmiejskim i wiejskim) została przygotowana predykcja od sytuacji aktualnej (stan na rok 2018) do sytuacji docelowej (stan na rok 2025). W analizach wykorzystane zostały aktualne dane pozyskane od operatorów (analizy wg stanu na koniec 2017 rok) a w przypadku zapotrzebowania docelowego (do 2025 r.) wykorzystano dodatkowo raporty branżowe (m.in.: Cisco, Ericsson).

2.1. Metodyka wyznaczania parametrów do modelu

W pierwszym kroku przeprowadzono analizę czynników, które mają istotne znaczenie dla wzrostu zapotrzebowania na usługi transmisji danych w oparciu o raporty firm Ericsson [10-15] oraz Cisco [1-4]. Zgodnie z rocznymi danymi prezentowanymi w raportach CISCO i Ericssona roczny wzrost obciążenia ruchu mobilnego wynosi 40%. Natomiast w odróżnieniu od raportów Ericssona raporty Cisco podają zmiany w czasie obciążenia ruchu mobilnego przyjmując dane za lata 2018-2021 za prawidłowe oraz dokonując własnej estymacji na lata 2022-2025 otrzymujemy, że średni roczny wzrost obciążenia byłby równy 39%.

Na wzrost ruchu w sieciach mobilnych, według raportów firm Cisco i Ericsson, wpływ będzie miał głównie stały przyrost ruchu wideo, który będzie stanowił w latach 2021-2012 70-75% całości ruchu transmisji danych. Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na wzrost wolumenu ruchu na kartę SIM jest przewidywany przyrost liczby urządzeń typu smartfon, umożliwiających odbiór treści wideo na coraz większych ekranach, z coraz lepszą jakością (SD, HD, UHD). Przyrost liczby smartfonów, szacowany na 10% rocznie, będzie odbywał się kosztem urządzeń starszych generacji, głównie przystosowanych do sieci typu 2G, nie zmieniając przy tym łącznej liczby aktywnych urządzeń.

W oszacowaniu wartości wzrostu zapotrzebowania na usługi transmisji danych do 2025 roku posłużono się modelem liniowym oraz wykładniczym przyjmując wartości z funkcji wzrostu oraz najwyższą miesięczną wartość zużycia danych podaną przez operatorów na koniec roku 2017, wynoszącą 5,84 GB na kartę SIM oraz średnią wartość na podstawie danych otrzymanych przez operatorów na poziomie 3,5 GB/SIM. Powyższe warunki oznaczają, że w 2025 roku zapotrzebowanie na usługi mobilne wahałoby się w przedziale od 81,04 GB/SIM (model liniowy) do 132,92 GB (model wykładniczy)[1].

Na podstawie analizy literatury empirycznej związanej z estymacją wzrostu zapotrzebowania na usługi transmisji danych do modelu „zapotrzebowanie-podaż" wykorzystano także funkcję Gompertza oraz model logistyczny prosty [17, 19-21].

Funkcja Gompertza może być zapisana w następujący sposób:

$$P_t = K * e^{[\ln\left(\frac{P_0}{K}\right) * e^{-\alpha * t}]} \quad (1)$$

gdzie:

[1] Przyjmując średnią miesięczną wartość zużycia danych na poziomie 3,5 GB/SIM na koniec roku 2017, zapotrzebowanie w 2025 r. wahałoby się od 48,57 GB/SIM (model liniowy) do 79,66 GB/SIM (model wykładniczy).

- K – wartość docelowa wzrostu obciążenia (tu przyjmujemy wartość z modelu prostego/ wykładniczego w 2025 r.),
- P_0 – wartość początkowa (tu najwyższa wartość obciążenia podana przez operatorów),
- α – parametr wzrostu[2] (w związku z ograniczonym horyzontem predykcji parametr przyjmie postać zaproponowaną przez Kovacsa, Mogensena, Christensa i Jarvela [18]:

$$\alpha = \frac{1}{t_{MaxG}} * \ln[-\ln(\frac{P_0}{K})] \quad (2)$$

dla którego współczynnik t_{MaxG} został przyjęty na poziomie 1,63 (wyznaczony na podstawie ilorazu największej i najmniejszej wartości wzrostu obciążenia w latach 2018-2025).

Model logistyczny prosty przyjmuje natomiast następującą postać:

$$P_t = \frac{K}{1+a*e^{-b*t}} \quad (3)$$

gdzie:

- K – wartość docelowa wzrostu obciążenia (tu przyjmujemy wartość z modelu prostego/ wykładniczego w 2025 r.),
- a – parametr dopasowania[3] (przyjmujemy wartość zaproponowaną przez Dergiadesa i Dasilasa [6]),
- b – parametr dopasowania[4] (przyjmujemy wartość zaproponowaną przez Dergiadesa i Dasilasa [6]).

2.2. Metodyka dopasowania parametrów do poszczególnych obszarów

Zgodnie z danymi z raportu Ericssona [15] nasycenie rynku telekomunikacyjnego (mierzone liczbą kart SIM per capita) w Europie Środkowo-Wschodniej wynosi 144%, co jest zgodne z danymi z opracowania Urzędu Komunikacji Elektronicznej [22]. Jednak dane udostępnione przez operatorów wskazują, że poziom ten w trzecim kwartale 2017 r. wynosi 134,2%, i to ta wartość została przyjęta do modelu dla poszczególnych obszarów jako stała[5].

Zgodnie z prognozami Głównego Urzędu Statystycznego [7] w 2025 r. liczba ludności ma zmniejszyć się o prawie 360 tys. osób, tj. o 0,9% ogółem, czyli o 0,2269% rocznie. Liczba ludności na obszarach gęsto zaludnionych (Dense Urban) i zaludnionych (Urban) zmniejszy się łącznie o prawie 490 tys. osób, tj. o 0,3337% rocznie, na obszarach słabo zaludnionych (Suburban) o prawie 70 tys. osób, tj. o 0,0955% rocznie, natomiast na obszarach wiejskich (Rural) zwiększy się o prawie 200 tys. osób, tj. o 0,2249% rocznie. W modelach zostało przyjęte założenie, że podział ludności w obszarach Dense Urban i Urban tj. 20:80, nie ulegnie zmianie. W tym aspekcie liczba ludności na obszarach gęsto zaludnionych zmniejszy się o 100 tys. osób, a obszarach zaludnionych o 390 tys. osób.

[2] Wartość parametru wzrostu wynosi 59,3%.
[3] Wartość parametru dopasowania „a" jest równa 75,67.
[4] Wartość parametru dopasowania „b" jest równa 0,63.
[5] Zakłada się zmniejszenie liczby kart SIM wynikające z wymogu rejestracji kart prepaid przez użytkowników wynikające z zapisów ustawy antyterrostycznej.
Zgodnie z danymi z raportów Ericssona w Europie Środkowo-Wschodniej występuje nasycenie kart SIM, stąd zakłada się, że użytkownicy będą jedynie wymieniać modele telefonów na nowsze.

Na podstawie danych otrzymanych od operatorów, można zauważyć znaczące różnice średnich wolumenów ruchu obsługiwanego przez poszczególne stacje bazowe dla wszystkich typów obszarów oraz na pojedynczą kartę SIM. W toku analiz postanowiono wybrać wartości maksymalne wolumenu ruchu dla każdego typu obszaru oraz łącznego ruchu w sieci, w celu uniknięcia niedoszacowania w wynikach prowadzonych analiz.

Należy zauważyć, że 17,5% użytkowników miało dostęp do internetu mobilnego w 2015 r. [5], natomiast według raportu GUS-u [8] odsetek osób posiadających mobilny dostęp do szerokopasmowego łącza wynosił 39%. W raporcie GUS-u [8] podano, że ponad 80% osób mieszkających w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców ma dostęp do szerokopasmowego internetu (zarówno stacjonarnego i mobilnego), stąd zapotrzebowanie na usługi mobilne na tych obszarach, wyrażone wielkością generowanego ruchu przez pojedynczą kartę SIM, powinno być mniejsze, gdyż użytkownicy mają możliwość substytucji usług mobilnych usługami stacjonarnymi. Z kolei na obszarach podmiejskich i wiejskich, na których w wielu miejscach szerokopasmowe sieci mobilne będą jedyną dostępną technologią szerokopasmową, należy spodziewać się zwiększonych wolumenów ruchu generowanego przez urządzenia typu routery stacjonarne z kartami SIM, telewizory Smart HD i UHD, wizyjne systemy monitoringu, itp.

Biorąc powyższe pod uwagę, do modelu przyjęte zostały odchylenia od wartości średniej wolumenu ruchu dla poszczególnych typów obszarów. Dla obszaru:

- Dense Urban – odchylenie na poziomie (-3,0%),
- Urban – odchylenie na poziomie (-2,0%),
- Suburban – odchylenie na poziomie (+4,0%),
- Rural – odchylenie na poziomie (+1,0%).

Należy zauważyć, że zarówno średni wolumen ruchu na kartę SIM jak i odchylenia od wartości średniej dla poszczególnych typów obszarów, powinny być na bieżąco monitorowane i aktualizowane przez operatorów, na podstawie rzeczywistego ruchu obserwowanego w sieci.

2.3. Analiza wpływu liczby urządzeń na wzrost zapotrzebowania

Jak wskazują raporty Cisco i Ericssona ponad 80% wzrostu zapotrzebowania na usługi transmisji danych jest generowane za pośrednictwem smartfonów, podczas gdy udział innych telefonów komórkowych nie przekracza 1,5%. Równie ważnym urządzeniem są tablety, dla których wzrost zapotrzebowania do 2021 roku ma ulec prawie trzykrotnemu zwiększeniu, a smartfony i tablety mają być odpowiedzialne za 95% zapotrzebowania na usługi transmisji danych ogółem. Jak wskazują dane Cisco, udział smartfonów w strukturze wszystkich urządzeń ma wzrosnąć z 21% w 2016 roku do 23% w 2021 roku, a tabletów pozostać na niezmienionym poziomie[6]. Zakładając utrzymanie wzrostu do 2025 roku udział smartfonów powinien być równy 25%.[7] Z kolei wzrost zapotrzebowania dla usług M2M będzie wynikał w głównej mierze ze znaczącego przyrostu tego typu urządzeń, co w przeliczeniu na pojedyncze urządzenie będzie stanowić ułamkową wartość, stąd zostały one pominięte w badaniu. Warto także wziąć pod uwagę pozostałe urządzenia mobilne, nie

[6] Przyjęto zgodnie z danymi CISCO, że udział tabletów będzie w każdym roku wynosić 3,0%.
[7] Zgodnie z danymi zaprezentowanymi w raportach CISCO zakładamy, 10% wzrost zapotrzebowania w każdym roku.

zaklasyfikowane do wcześniej wymienionych grup, które mogą wpłynąć na oszacowania modelu[8]. Według danych Cisco poziom nasycenia liczby urządzeń mobilnych na osobę w Polsce w 2021 r. ma wynosić 1,07. Zgodnie z raportem GUS-u [8] grupą, która w najmniejszym stopniu korzysta z urządzeń przenośnych są osoby powyżej 65 roku życia, co przekłada się także na znikome zapotrzebowanie na usługi mobilne. Według oszacowań na podstawie struktury ludności w latach 2003-2016 odsetek osób powyżej 65 roku życia może stanowić 17,7% ogółu ludności w 2025 r., co w latach 2018-2025 dałoby średnią na poziomie 16,9%. Uwzględniając również mniejsze zapotrzebowanie w grupie wiekowej 55-64 uwzględniono w modelu wartość docelową zgodną z raportami Cisco.

2.4. Wyniki modelowania wzrostu zapotrzebowania

Zestawienie parametrów zastosowanych w modelach zaprezentowano w tabelach 1 i 2. Natomiast zestawienie wyników prognoz zaprezentowano w tabeli 3. Model Cisco zakłada przyrost wzrostu zapotrzebowania na usługi transmisji danych o zakładaną wartość 40% i podaną wartość początkową w raportach równą 2,3 GB. Z kolei model prosty i wykładniczy zakładają wartości wyjściowe podane przez operatorów wraz z przyjęciem innych parametrów odwołujących się do przyrostu zapotrzebowania oraz zawierają modele dostosowujące (logistyczny i Gompertza) do prognozowanego poziomu końcowego. Należy pamiętać, że wybór odpowiedniego modelu powinien być kalibrowany w oparciu o nowe dane z sieci operatorów. Modele własne zostały również przetestowane dla danych historycznych prezentowanych przez operatorów fińskich, gdzie lepsze dopasowanie uzyskał model wykładniczy, co wynikało z zaoferowania ofert bez limitu pobierania danych dla użytkowników.

Tabela 1. Zestawienie parametrów zastosowanych w modelu

Zmienna	Wartość
Parametr wzrostu (Model Gompertza)	59,3%
Parametr wzrostu I (Model logistyczny)	75,67
Parametr wzrostu II (Model logistyczny)	0,63
Zmiana obciążenia sieci (CISCO)	40,0%
Data 2017 r. [GB/month/SIM] – najwyższa	5,84
Data 2017 r. [GB/month/SIM] - średnia	3,50
Data 2017 r. [GB/month] – Dense Urban	7 434
Data 2017 r. [GB/month] - Urban	9 544
Data 2017 r. [GB/month] - Suburban	10 257
Data 2017 r. [GB/month] - Rural	7 413

[8] Przyjęto wzrost udziału z poziomu 1,6% w 2016 roku do 1,9% w 2025 r.

Tabela 2. Zestawienie parametrów rocznych zastosowanych w modelu

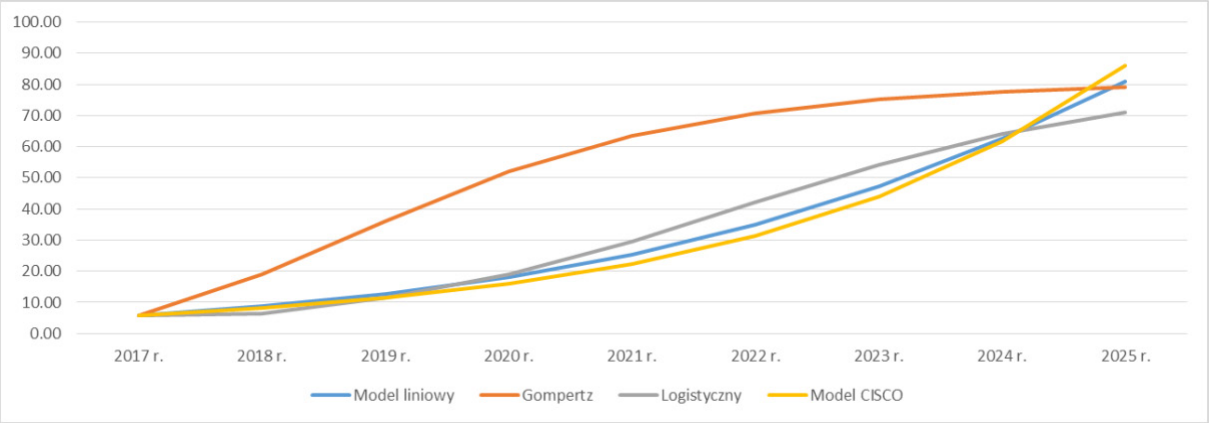
	2018 r.	2019 r.	2020 r.	2021 r.	2022 r.	2023 r.	2024 r.	2025 r.
Odchylenie od średniego obciążenia sieci								
Dense Urban	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%	-3%
Urban	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%	-2%
Suburban	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
Rural	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
Zmiana liczby ludności								
Ogółem	-0,06%	-0,07%	-0,09%	-0,11%	-0,12%	-0,14%	-0,16%	-0,18%
Dense Urban	-0,25%	-0,27%	-0,30%	-0,32%	-0,34%	-0,37%	-0,39%	-0,42%
Urban	-0,25%	-0,27%	-0,30%	-0,32%	-0,34%	-0,37%	-0,39%	-0,42%
Suburban	-0,04%	-0,05%	-0,07%	-0,08%	-0,10%	-0,12%	-0,14%	-0,16%
Rural	0,24%	0,24%	0,24%	0,23%	0,22%	0,22%	0,20%	0,19%
Inne parametry								
Nasycenie SIM	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
Zmiana zapotrzebowania	48,4%	45,7%	43,1%	40,4%	37,7%	35,1%	32,4%	29,7%

Tabela 3a. Zestawienie uzyskanych wyników prognoz wzrostu zapotrzebowania (w GB/miesiąc)

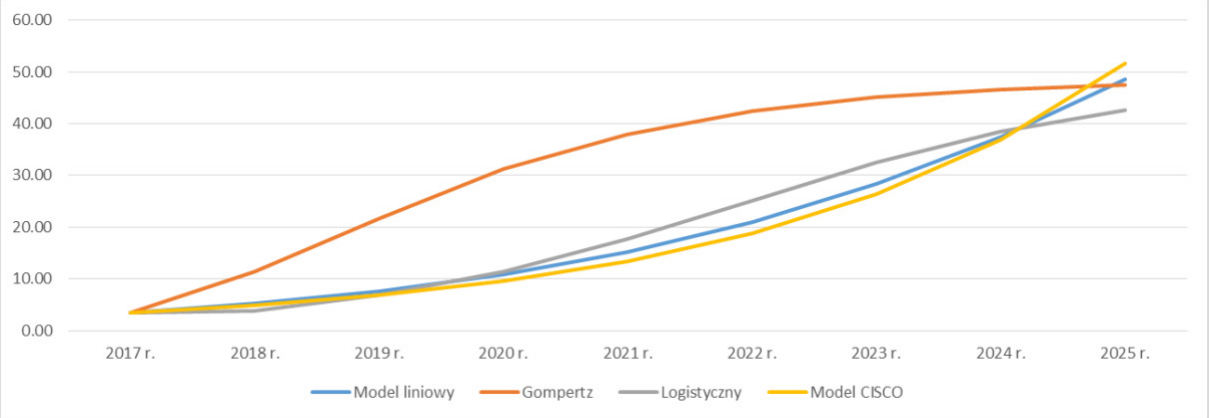
	2017 r.	2018 r.	2019 r.	2020 r.	2021 r.	2022 r.	2023 r.	2024 r.	2025 r.
MODEL OGÓLNY (na kartę SIM) – wartość najwyższa									
Model liniowy	5,84	8,66	12,62	18,06	25,36	34,93	47,17	62,44	80,99
Gompertz - liniowy	5,84	19,47	37,89	54,73	67,06	75,03	79,83	82,61	84,19
Logistyczny - liniowy	5,84	6,91	12,10	20,21	31,45	44,70	57,65	68,19	75,55
Model wykładniczy	5,84	8,71	13,00	19,39	28,93	43,15	64,38	96,04	143,27
Gompertz - wykładniczy	5,84	24,45	53,93	83,50	106,31	121,49	130,79	136,24	139,34
Logistyczny - wykładniczy	5,84	6,36	11,48	20,12	33,60	52,28	74,30	95,83	113,35
Model CISCO	5,84	8,18	11,45	16,02	22,43	31,41	43,97	61,56	86,19
MODEL OGÓLNY (na kartę SIM) – wartość średnia									
Model liniowy	3,50	5,19	7,57	10,83	15,21	20,95	28,29	37,45	48,57
Gompertz - liniowy	3,50	11,67	22,71	32,80	40,19	44,96	47,84	49,51	50,46
Logistyczny - liniowy	3,50	4,14	7,25	12,11	18,85	26,79	34,55	40,86	45,28
Model wykładniczy	3,50	5,22	7,79	11,62	17,34	25,86	38,58	57,56	85,86
Gompertz - wykładniczy	3,50	14,65	32,32	50,04	63,71	72,81	78,39	81,65	83,51
Logistyczny - wykładniczy	3,50	3,81	6,88	12,06	20,14	31,33	44,53	57,43	67,93
Model CISCO	3,50	4,90	6,86	9,60	13,45	18,82	26,35	36,89	51,65

Tabela 4b. Zestawienie uzyskanych wyników prognoz wzrostu zapotrzebowania (w GB/miesiąc)

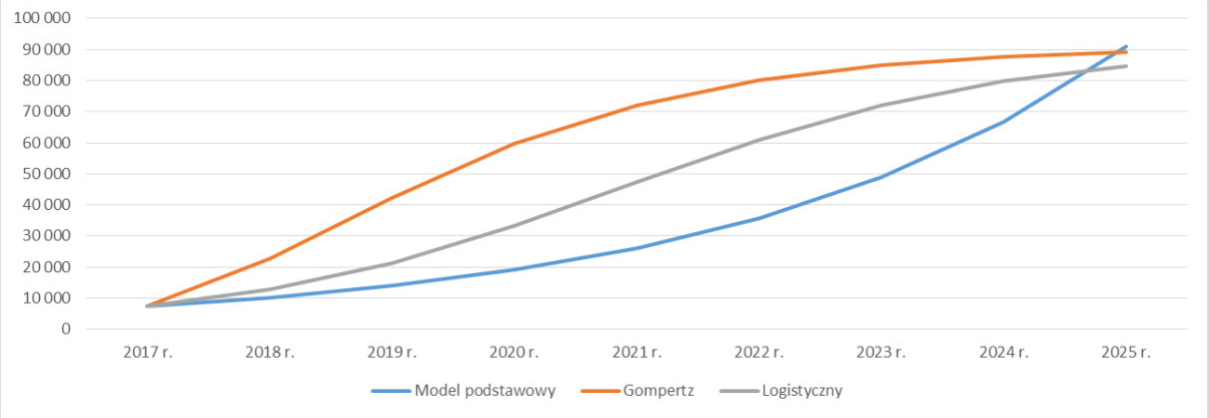
	2017 r.	2018 r.	2019 r.	2020 r.	2021 r.	2022 r.	2023 r.	2024 r.	2025 r.
MODEL SZCZEGÓŁOWY (na stację bazową)									
Dense Urban									
Model liniowy	7 434	10 802	15 404	21 551	29 569	39 772	52 419	67 671	85 535
Gompertz - liniowy	7 434	22 177	40 569	56 642	68 113	75 420	79 788	82 310	83 738
Logistyczny - liniowy	7 434	12 012	20 060	31 209	44 358	57 212	67 670	74 978	79 561
Model wykładniczy	7 434	11 698	17 921	26 722	38 787	54 800	75 361	100 876	131 434
Gompertz - wykładniczy	7 434	26 877	54 676	80 952	100 554	113 355	121 114	125 627	128 193
Logistyczny - wykładniczy	7 434	10 534	18 458	30 824	47 957	68 161	87 913	103 983	115 213
Urban									
Model liniowy	9 544	13 963	20 051	28 254	39 048	52 910	70 263	91 409	116 450
Gompertz - liniowy	9 544	29 229	54 251	76 354	92 225	102 369	108 446	111 957	113 945
Logistyczny - liniowy	9 544	16 354	27 310	42 490	60 390	77 891	92 128	102 079	108 318
Model wykładniczy	9 544	15 170	23 472	35 351	51 828	73 960	102 732	138 897	182 792
Gompertz - wykładniczy	9 544	35 762	74 206	111 074	138 806	156 999	168 056	174 496	178 160
Logistyczny - wykładniczy	9 544	14 650	25 671	42 868	66 696	94 795	122 265	144 614	160 233
SubUrban									
Model liniowy	10 257	15 621	23 369	34 329	49 500	70 039	97 204	132 278	176 433
Gompertz - liniowy	10 257	36 630	74 013	109 171	135 326	152 379	162 706	168 711	172 123
Logistyczny - liniowy	10 257	14 141	24 778	41 377	64 375	91 497	118 012	139 583	154 658
Model wykładniczy	10 257	17 311	28 442	45 486	70 809	107 295	158 252	227 192	317 478
Gompertz - wykładniczy	10 257	47 642	111 312	177 908	230 531	266 020	287 923	300 790	308 145
Logistyczny - wykładniczy	10 257	14 097	25 445	44 586	74 455	115 839	164 642	212 353	251 169
Rural									
Model liniowy	7 413	11 068	16 226	23 349	32 969	45 661	62 004	82 520	107 596
Gompertz - liniowy	7 413	24 537	47 539	68 513	83 845	93 744	99 706	103 162	105 123
Logistyczny - liniowy	7 413	8 624	15 111	25 233	39 259	55 799	71 969	85 123	94 317
Model wykładniczy	7 413	12 142	19 359	30 045	45 390	66 746	95 535	133 100	180 498
Gompertz - wykładniczy	7 413	30 927	68 097	105 327	134 031	153 123	164 817	171 657	175 557
Logistyczny - wykładniczy	7 413	8 015	14 466	25 349	42 330	65 859	93 605	120 730	142 798



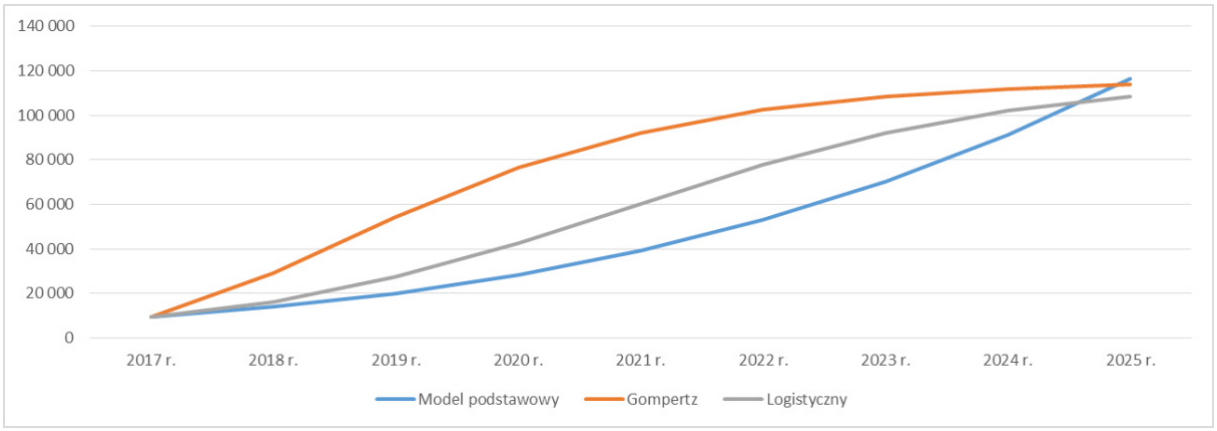
Rys. 1. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla modelu liniowego przy najwyższej wartości zapotrzebowania w 2017 r*



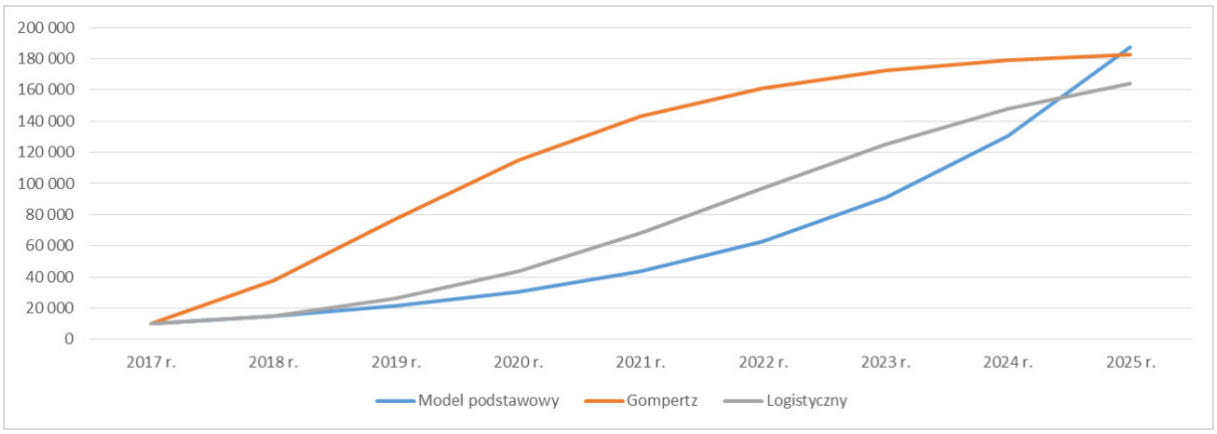
Rys. 2. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla modelu liniowego przy średniej wartości zapotrzebowania w 2017 r.*



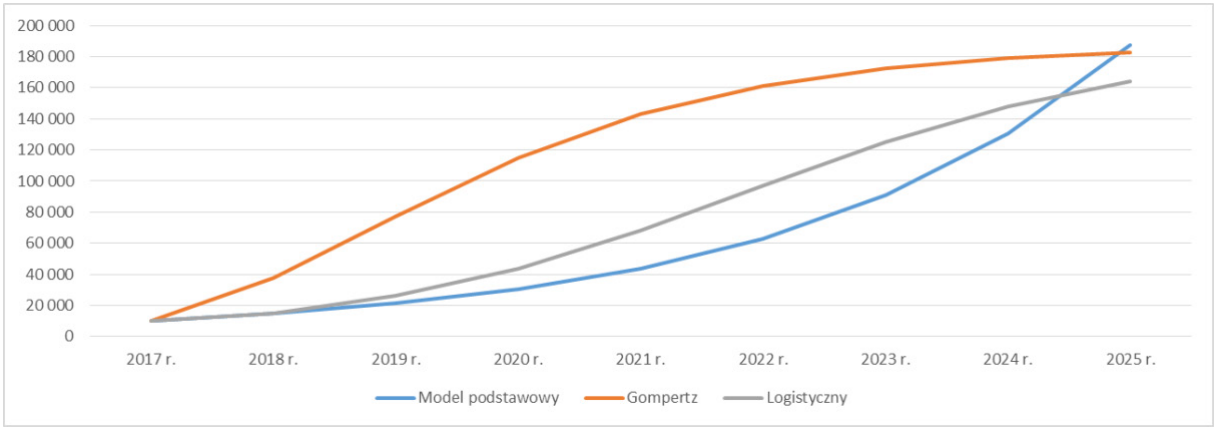
Rys. 3. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla obszaru Dense Urban dla modelu liniowego*



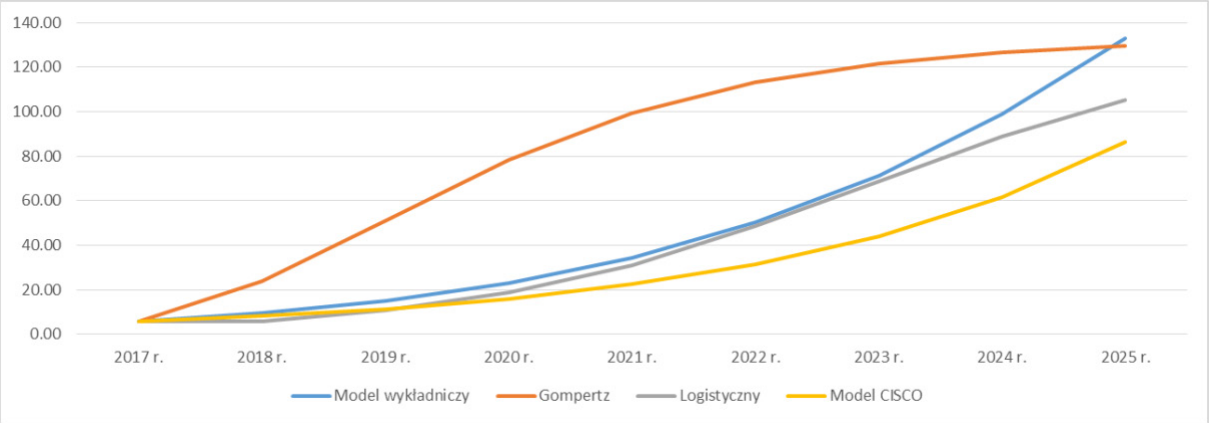
Rys. 4. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla obszaru Urban dla modelu liniowego*



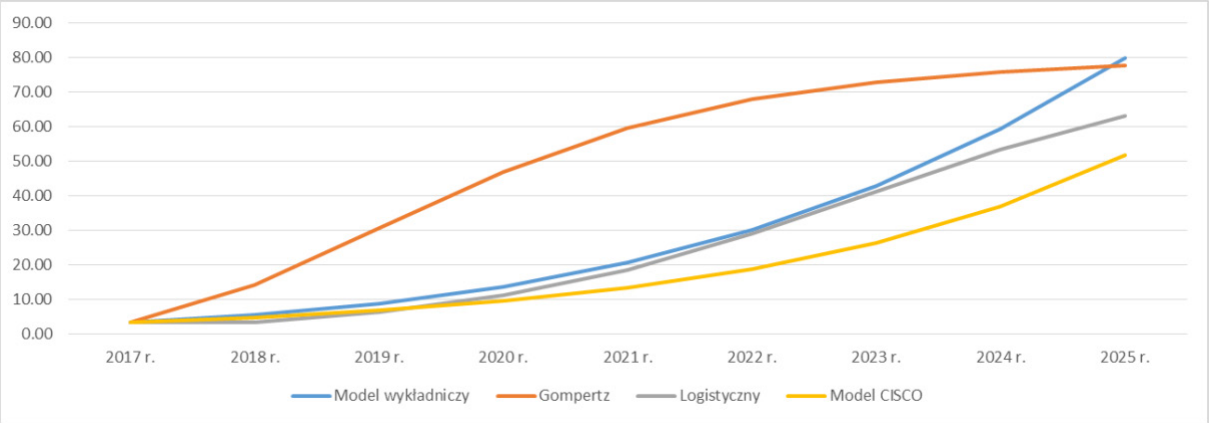
Rys. 5. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla obszaru SubUrban dla modelu liniowego*



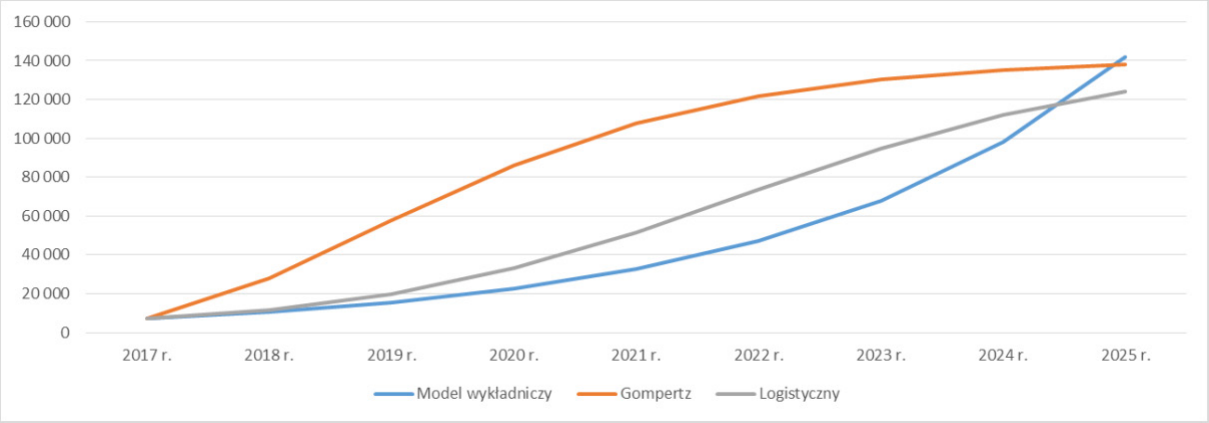
Rys. 6. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla obszaru Rural dla modelu liniowego*



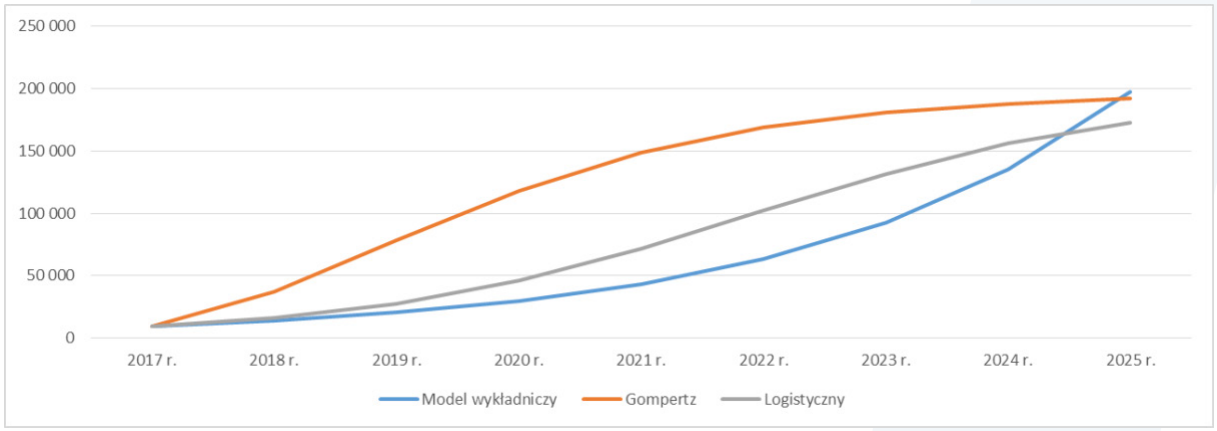
Rys. 7. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla modelu wykładniczego przy najwyższej wartości zapotrzebowania w 2017 r.*



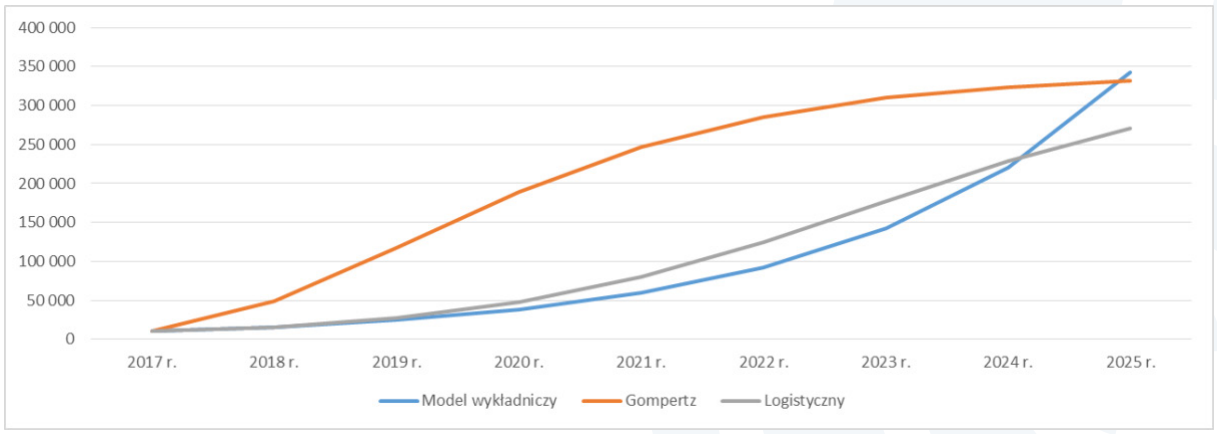
Rys. 8. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla modelu wykładniczego przy średniej wartości zapotrzebowania w 2017 r.*



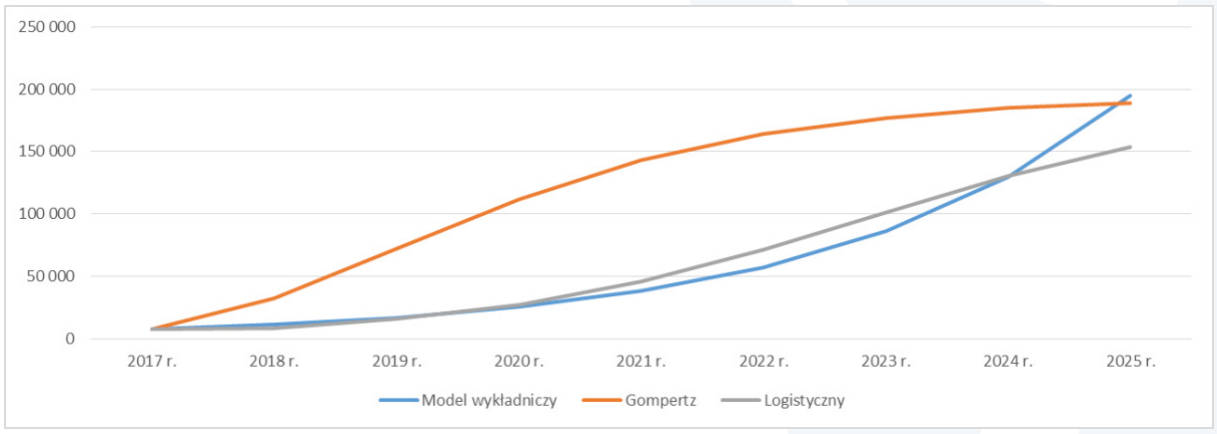
Rys. 9. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla obszaru Dense Urban dla modelu wykładniczego.*



Rys. 10. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla obszaru Urban dla modelu wykładniczego.*



Rys. 11. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla obszaru SubUrban dla modelu wykładniczego.*



Rys. 12. Wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych (w GB/miesiąc) *dla obszaru Rural dla modelu wykładniczego.*

3. Model weryfikujący maksymalne pojemności sieci 3G/4G/5G

Niniejszy rozdział zawiera opis modelu pojemnościowego, który został stworzony w arkuszu kalkulacyjnym Excel w ramach niniejszej pracy i stanowi Załącznik nr 1 do tego raportu.

Plik z modelem zawiera następujące zakładki (arkusze):

- Info,
- Bilans łącza radiowego,
- Konfiguracja sektora,
- Dane GUS.
- Bilans pojemności,

3.1. Zakładka Info

Zakładka *Info* zawiera krótki opis modelu, sposób instalacji dodatkowych bibliotek oraz skrócony podręcznik użytkowania modelu.

3.2. Zakładka Bilans łącza radiowego

Zakładka *Bilans łącza radiowego* zawiera podstawowe dane konfiguracyjne (parametry) stacji bazowych oraz terminali dla wszystkich trzech typów systemów komórkowych: 3G, 4G i 5G. Parametry te można wprowadzać niezależnie dla każdego z trzech systemów oraz dla każdego z 4 typów środowisk propagacyjnych: wiejskiego (Rural), podmiejskiego (Suburban), miejskiego (Urban) i wielkomiejskiego (Dense Urban).

Na podstawie wprowadzonych danych automatycznie wyliczają się wymagane czułości odbiornika danego systemu i na podstawie analizy bilansu łącza radiowego wyznaczane są następnie maksymalne zasięgi stacji, które uwzględniają następujące aspekty:

- rodzaj systemu: 3G/4G/5G,
- pasmo częstotliwości: 700/800/900/1800/2100/2600/3600[9] MHz,
- szerokość kanału: 5/10/15/20 MHz,
- rodzaj zastosowanej modulacji.

Parametry przejęte w bilansie łącza radiowego przyjęto na podstawie literatury, specyfikacji systemów oraz danych udostępnionych przez operatorów sieci komórkowych. Na wstępie analizy bilansu łącza radiowego założono, że jest on zbilansowany dla obu kierunków transmisji i w dalszej części analizowano tylko łącze w dół.

Poniżej przedstawiono przykładowy bilans łącza radiowego dla łącza w dół dla następujących konfiguracji systemów:

- 3G (HSUPA), 900 MHz, SF=16, modulacja QPSK
- 4G, 900 MHz, szerokość kanału 5 MHz, modulacja QPSK 4/5,
- 5G, 900 MHz, szerokość kanału 5 MHz, modulacja QPSK 4/5.

[9] Oznaczenie 3600 MHz odnosi się do całego zakresu pasma częstotliwości 3.4-3.8 GHz

Parametr / System	3G	4G	5G	
Moc promieniowana EIRP [dBm]	63	63	63	A
Zysk anteny odbiorczej [dBi]	0	0	0	B
Zysk wynikający z odbioru zbiorczego [dB]	0	3	6	C
Straty w kablach i złączach [dB]	0	0	0	D
Czułość odbiornika [dBm]	-105,7	-88,8	-88,8	E
Maksymalne tłumienie propagacyjne [dB]	168,7	154,8	157,8	F=A+B+C-D-E
Margines na interferencje [dB]	7	0	0	G
Margines systemowy [dB]	4,6	4,6	4,6	H
Graniczne tłumienie propagacyjne [dB]	157,1	150,2	153,2	I=F-G-H

Występująca w bilansie czułość odbiornika wyliczana jest automatycznie na podstawie poniższych zależności, dla każdego z systemów niezależnie [26-37].

$$R_{SS\,3G}[dBm] = -174 + 10 \cdot log_{10}(3\,840\,000) + NF + IM + SNR - 10 \cdot log_{10}(SF) \quad (4)$$

$$R_{SS\,4G}[dBm] = -174 + 10 \cdot log_{10}(N_{RB} \cdot 180\,000) + NF + IM + SNR + D_{FB} \quad (5)$$

$$R_{SS\,5G}[dBm] = -174 + 10 \cdot log_{10}(N_{RB} \cdot 180\,000) + NF + IM + SNR + D_{FB} \quad (6)$$

gdzie:

NF – Noise Figure – szumy własne odbiornika,

IM – Implementation Margin – straty implementacyjne zależne od rodzaju modulacji,

N_{RB} – liczba bloków zasobów,

SF – Spreading Factor – współczynnik rozpraszania widma,

SNR – wymagany dla danego rodzaju modulacji stosunek sygnału do szumu,

D_{FB} – współczynnik wykorzystania pasma.

Wartości parametrów występujących w powyższych wzorach przyjęto na podstawie literatury, specyfikacji systemów oraz danych pozyskanych od operatorów sieci komórkowych w Polsce. Model umożliwia wprowadzenie zmian w wartościach tych parametrów.

Dla każdej możliwej konfiguracji częstotliwości i szerokości kanału wyznaczono dla poszczególnych systemów czułości odbiornika reprezentujące granicę zasięgów (najniższy schemat modulacji - QPSK) oraz granice zasobów sieci (najwyższy schemat modulacji 64 QAM lub 256 QAM). W ten sposób dla każdej możliwej konfiguracji systemów 3G/4G/5G wyznaczane są graniczne tłumienia propagacyjne, na podstawie których w kolejnym kroku wyznaczane są odpowiednie zasięgi.

Arkusz kalkulacyjny z modelem pojemnościowym ma zintegrowaną bibliotekę umożliwiającą automatyczne wyznaczanie zasięgów stacji bazowych na podstawie modelu Okumura-Hata i COST Hata [38, 39]. Parametry stacji bazowych wszystkich systemów w poszczególnych środowiskach propagacyjnych można konfigurować niezależnie, podobnie jak parametry terminali. W ten sposób dla wprowadzonych w modelu konfiguracji systemów 3G/4G/5G wyznaczane są w sposób

automatyczny zasięgi dla poszczególnych środowisk propagacyjnych zależne od wykorzystywanego pasma częstotliwości oraz szerokości kanału.

Kolejnym ważnym elementem zakładki *Bilans łącza radiowego* jest wyznaczenie teoretycznych zasobów poszczególnych systemów w zdefiniowanych konfiguracjach. Zasoby w [Mb/s] wyznaczane są dla przypadku niskiego schematu modulacyjno-kodowego na granicy sektora oraz dla wysokiego schematu definiującego maksymalne zasoby. W przypadku sieci 3G jako granicę zasięgu przyjęto schemat modulacji QPSK i sprawność kodowania 0,76, a do wyznaczenia maksymalnych zasobów schemat modulacji 64QAM i sprawność kodowania 0,98. W przypadku sieci 4G jako granicę zasięgu przyjęto schemat modulacji QPSK i sprawność kodowania 0,8, a do wyznaczenia maksymalnych zasobów sieci schemat modulacji 64QAM i sprawność kodowania 0,8 oraz schemat modulacji 256QAM i sprawność kodowania 0,8. Z kolei dla sieci 5G granicę zasięgu wyznaczono dla schematu modulacji QPSK i sprawności kodowania 0,8, a do wyznaczenia maksymalnych zasobów sieci przyjęto schemat modulacji 256QAM i sprawność kodowania 0,8.

Teoretyczne zasoby systemów (rozumiane jako szybkość transmisji w łączu w dół), bez uwzględnienia MIMO i agregacji pasm, wyznaczano na podstawie poniższych zależności, dla każdego z systemów niezależnie [26-37]:

$$R_{B\ 3G}[Mb/s] = \frac{3{,}84}{SF} \cdot N_C \cdot K \cdot CR \tag{7}$$

$$R_{B\ 4G}[Mb/s] = \frac{L_S \cdot 1000 \cdot 12 \cdot N_{RB} \cdot K \cdot E_{af}}{1024 \cdot 1024} \tag{8}$$

gdzie:

SF – Spreading Factor – współczynnik rozpraszania widma,

N_C – Maksymalna liczba kodów użytych w kanale transportowym,

K – liczba bitów przypadająca na symbol modulacyjny,

CR – sprawność kodowania kanałowego,

L_S – Liczba podnośnych ,

N_{RB} – liczba bloków zasobów,

E_{af} – Wynikowa efektywność transmisji danych użytkowych uwzględniająca sprawność kodowania kanałowego

D_{FB} – współczynnik wykorzystania pasma.

W przypadku sieci 5G wykorzystano tę samą zależność jak dla sieci 4G, przy czym dodatkowo założono zwielokrotnienie pojemności sieci 5G w stosunku do sieci 4G, wynikające z zastosowania nowych technologii (m.in. Massive MIMO, mechanizmy zarządzania interferencjami i mobilnością), i do dalszej analizy przyjęto, że wynosi ono 2,5.

W ten sposób wyznaczono teoretyczne zasoby poszczególnych systemów w zależności od wykorzystywanego schematu modulacji i szerokości kanału radiowego. Jednocześnie zdefiniowano również współczynniki określające rzeczywiste wykorzystanie zasobów w poszczególnych systemach. W przypadku sieci 3G i 4G przyjęto, na podstawie danych pochodzących od operatorów, wartość 35%, natomiast w przypadku sieci 5G założono, że możliwe będzie bardziej efektywne wykorzystanie zasobów i współczynnik ten wynosi 50%.

3.3. Zakładka Konfiguracja sektora

Zakładka *Konfiguracja sektora* pozwala na wprowadzenie konfiguracji sektorów w dwóch warstwach Mikro i Makro w różnych środowiskach propagacyjnych. Model pojemnościowy zakłada, że każda stacja bazowa będzie miała taką samą konfigurację, która definiowana jest w tej zakładce.

Dla każdego systemu w poszczególnych pasmach częstotliwości można zdefiniować następujące parametry:

- obsługa modulacji 256QAM (wartość 0 = nie, wartość 1 = tak) – domyślnie wyłączona dla sieci 4G (wartość 0) i włączona dla sieci 5G (wartość 1),
- zwielokrotnienie MIMO po stronie stacji bazowej (wartość 1 = bez MIMO, 2 = MIMO 2x2, 4 = MIMO 4x4) – domyślnie MIMO 2x2 dla sieci 3G i 4G (wartość 2) i MIMO 4x4 dla sieci 5G (wartość 4),
- agregacja kanałów wewnątrz pasma (1 = brak agregacji, 2 = agregacja 2 kanałów, itd.).– domyślnie wykorzystanie tylko jednego kanału dla wszystkich systemów (wartość 1).

Wykorzystanie konkretnego systemu w warstwie Mikro lub Makro dla danego typu środowiska propagacyjnego oznacza się poprzez wprowadzenie w wierszu opisanym jako *Wykorzystanie systemu* wartości odpowiadającej wielokrotności wykorzystania tego zasobu. I tak wartość 1 oznacza użycie systemu na każdej stacji, wartość 0,5 oznacza użycie sytemu na co drugiej stacji, natomiast wartość 2 to użycie dwóch kanałów w tym samym paśmie częstotliwości, itd. Po wprowadzeniu wartości w tym polu, na podstawie wartości parametrów zdefiniowanych w zakładce *Bilans łącza radiowego* automatycznie wyliczają się następujące dane:

- przewidywany minimalny zasięg stacji, uwzględniający najwyższy zdefiniowany dla danego systemu schemat modulacji,
- przewidywany maksymalny zasięg stacji, uwzględniający najniższy zdefiniowany dla danego systemu schemat modulacji,
- teoretyczne zasoby systemu wynikające z najwyższego zdefiniowanego dla niego schematu modulacji oraz uwzględniające zwielokrotnienie MIMO i agregację kanałów wewnątrz pasma,
- rzeczywiste zasoby systemu, uwzględniające zdefiniowany dla danego typu systemu współczynnik określający rzeczywiste wykorzystanie jego zasobów
- minimalna przepływność na granicy sektora, wyznaczona jako teoretyczne zasoby systemu wynikające z najniższego zdefiniowanego dla tego systemu schematu modulacji oraz uwzględniające zwielokrotnienie MIMO i agregację kanałów wewnątrz pasma.

Po zakończeniu konfiguracji automatycznie wyznaczane są dla każdej warstwy Mikro i Makro oraz dla poszczególnych środowisk propagacyjnych następujące parametry:

- minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS}, wyznaczana jako najniższa wartość z przewidywanych minimalnych zasięgów stacji dla wybranych w tej konfiguracji systemów,
- maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS}, wyznaczana jako najniższa wartość z przewidywanych maksymalnych zasięgów stacji dla wybranych w tej konfiguracji systemów,
- zasoby teoretyczne dostępne w danym sektorze, wyznaczane jako suma teoretycznych zasobów wybranych w tej konfiguracji systemów,

- zasoby rzeczywiste dostępne w danym sektorze, wyznaczane jako suma rzeczywistych zasobów wybranych w tej konfiguracji systemów,
- minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora, wyznaczona jako suma minimalnych przepływności na granicy sektora dla wybranych w tej konfiguracji systemów.

Wartości tych parametrów są wykorzystywane w kolejnych etapach analizy pojemnościowej.

3.4. Zakładka Dane GUS

Zakładka *Dane GUS* zawiera informacje o przyroście liczby ludności w Polsce i w poszczególnych miastach oraz obliczenia związane z liczbą urządzeń per capita, które zostaną uwzględnione w analizie pojemnościowej.

Dane dotyczące ludności w poszczególnych miastach pochodzą z raportu Głównego Urzędu Statystycznego [7, 25]. Do wyznaczenia liczby urządzeń (terminali), branych pod uwagę w kolejnym kroku w analizie pojemnościowej, wykorzystywany jest model opracowany na podstawie raportów Cisco [23, 24]. Model ten przyjmuje pewne wartości początkowe oraz szybkości ich wzrostu w kolejnych latach. W uproszczeniu w modelu wyznacza się liczbę urządzeń przypadających na jednego mieszkańca w Polsce oraz procent, jaki stanowią urządzenia mobilne. Na podstawie zdefiniowanych przyrostów w poszczególnych kategoriach określana jest liczba urządzeń mobilnych przypadających na jednego mieszkańca. Ponieważ model Cisco [23] prezentuje prognozę do roku 2021, w którym wynikowa liczba urządzeń mobilnych per capita osiąga wartość 1,07, a inne źródła [7, 8] wskazują na stopniowe nasycanie się rynku, zdecydowano, że w kolejnych latach liczba ta nie będzie się już zwiększała.

Model umożliwia wprawdzie wprowadzenie niezależnej konfiguracji dla każdego z rozpatrywanych środowisk propagacyjnych, jednak do dalszej analizy przyjęto, ze liczba urządzeń mobilnych przypadających na pojedynczego mieszkańca będzie taka sama we wszystkich środowiskach.

Dla każdego rozpatrywanego obszaru: Polska (ogółem) oraz dla wybranych największych miast w Polsce należało określić wielkość obszaru przyporządkowaną dla danego typu środowiska propagacyjnego oraz procent populacji go zamieszkujący. Jako punkt wyjściowy przyjęto statystyczny podział obszarów i ludności w Polsce przedstawiony w poniższej tabeli.

Tabela 5. Podział statystyczny obszarów i ludności w Polsce

Środowisko	% ludności	% terenu
Wiejskie - Rural	28,0%	62,0%
Podmiejskie - Suburban	23,0%	33,0%
Miejskie - Urban	39,0%	4,6%
Wielkomiejskie - Dense Urban	10,0%	0,4%

W przypadku analizowanych miast również dokonano statystycznego podziału obszarów w nich występujących i odpowiadającej im liczby ludności. Rozpatrywano dwa typy miast, takie w których środowisko wielkomiejskie występuje bądź nie występuje. W obu przypadkach założono, że obszary wiejskie nie występują w miastach, a podział na pozostałe środowiska dokonywany jest proporcjonalnie do danych z powyższej tabeli.

Dodatkowo, na podstawie obserwacji ruchu w środowisku wielkomiejskim (Dense Urban) w sieciach operatorów komórkowych, stwierdzono, że liczba użytkowników generujących ten ruch znacząco przewyższa liczbę ludności przypisaną do tego środowiska. Wprowadzono więc dodatkowe założenie, że w godzinie największego ruchu w środowisku wielkomiejskim liczba użytkowników będzie wynikała z liczby ludności przynależnej do środowiska wielkomiejskiego oraz 50% ludności ze środowiska podmiejskiego i 20% ludności ze środowiska miejskiego. Takie podejście jest w dużym stopniu zbieżne z sytuacją obecnie obserwowaną przez operatorów w swoich sieciach komórkowych.

Ostatecznie do dalszej analizy, przyjęto przedstawiony w poniższej tabeli podział obszarów i ludności.

Tabela 6. Przyjęty do analizy podział statystyczny obszarów i ludności w Polsce

Środowisko	% ludności	% terenu
Polska		
Wiejskie - Rural	28,0%	62,0%
Podmiejskie - Suburban	23,0%	33,0%
Miejskie - Urban	39,0%	4,6%
Wielkomiejskie - Dense Urban	29,3%	0,4%
Miasta z obszarem wielkomiejskim		
Podmiejskie - Suburban	31,9%	86,8%
Miejskie - Urban	54,2%	12,1%
Wielkomiejskie - Dense Urban	40,7%	1,1%
Miasta bez obszarów wielkomiejskich		
Podmiejskie - Suburban	37,1%	87,8%
Miejskie - Urban	62,9%	12,2%

Dla każdego z rozpatrywanych miast, w oparciu o dane z GUS [7, 25] oraz przedstawione w powyższej tabeli podziały, wyznaczono wielkości obszarów w poszczególnych typach środowisk propagacyjnych oraz odpowiadającą im liczbę ludności. W kolejnym kroku, bazując na modelu określającym zależność liczby urządzeń mobilnych (terminali) od liczby ludności, wyznaczono gęstości urządzeń przypadające na 1 km^2 w poszczególnych typach środowisk. Dane te stanowią kluczowy parametr wejściowy w modelu pojemnościowym.

3.5. Zakładka Bilans pojemności

Zakładka *Bilans pojemności* jest kluczowym elementem modelu pojemnościowego.

W pierwszych kolumnach zakładki zostały zdefiniowane wymagane wartości zasięgu Best Server R_{BS} dla dwóch warstw mikro (kolumna C) i makro (kolumna F) w poszczególnych typach środowisk propagacyjnych oraz liczba sektorów do nich przypisana (kolumny E i H). Na tej podstawie wyznaczane są obszar pokrycia całej stacji oraz pojedynczego sektora, przy czym założono, że kształt komórki to sześciokąt foremny o boku R_{BS}.

Następnie na podstawie ustalonej konfiguracji sektorów w zakładce *Konfiguracja sektora* określane są teoretyczne i rzeczywiste zasoby sektorów w poszczególnych warstwach i środowiskach, które służą do wyznaczenia rzeczywistych zasobów danego typu sektora przypadających na 1 km^2.

Wypadkowe (łączne) zasoby teoretyczne i rzeczywiste sektorów uwzględniające warstwy makro wyznaczamy na podstawie następującej zależności:

$$Zasoby_{wyp}\left[\frac{Mbps}{km^2}\right] = Zasoby_{mikro}\left[\frac{Mbps}{km^2}\right] + Zasoby_{makro}\left[\frac{Mbps}{km^2}\right] \cdot \frac{Obszar\ sektora\ mikro\ [km^2]}{Obszar\ sektora\ makro\ [km^2]} \quad (9)$$

Czyli zasoby warstwy makro uwzględniane są w warstwie mikro proporcjonalnie do wielkości obszarów sektora mikro względem makro.

Pierwsze wiersze zakładki ***Bilans pojemności*** prezentują analizę ogólną dla terenu całej Polski, który odpowiada małym i średnim miastom, natomiast kolejne wiersze odpowiadają wybranym dużym miastom i stanowią przypadek szczególny, gdzie infrastruktura jest dużo bardziej rozbudowana i występują dużo większe gęstości ludzi, a tym samym urządzeń. Wartości R_{BS} dla poszczególnych miast przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów, a w przypadku ogólnym dla Polski, wykorzystano dane przekazane przez operatorów sieci komórkowych i wartości R_{BS} wynikają z podzielenia obszaru danego typu środowiska przez liczbę stacji bazowych wszystkich operatorów w tym środowisku przy założeniu ok. 20% wspólnych lokalizacji.

W pierwszym kroku analizy wprowadzone zasięgi R_{BS} dla poszczególnych przypadków zostają automatycznie porównane z minimalnymi i maksymalnymi wymaganymi wartościami zasięgu Best Server, wyznaczanymi dla danej konfiguracji stacji w zakładce ***Konfiguracja sektora***. Wynik tego porównania niezależnie dla warstwy miko i makro prezentowany jest w kolumnach odpowiednio D i G. Przewidziano następujące wyniki porównania (weryfikacji zasięgowej):

- Zielone pole z tekstem „OK." oznacza, że wprowadzona wartość R_{BS} jest mniejsza niż minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server, wyznaczana dla danej konfiguracji sektora, uwzględniająca najwyższy zdefiniowany dla danego systemu schemat modulacji.
- Żółte pole z tekstem „Dopuszczalne" oznacza, że wprowadzona wartość R_{BS} jest większa niż minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server, wyznaczana dla danej konfiguracji sektora, uwzględniająca najwyższy zdefiniowany dla danego systemu schemat modulacji, ale jednocześnie jest mniejsza niż maksymalna wymagana wartość zasięgu Best Server, wyznaczana dla danej konfiguracji sektora, uwzględniająca najniższy zdefiniowany dla danego systemu schemat modulacji. Sytuacja ta oznacza, że na granicy komórki użytkownicy nie będą mogli wykorzystywać najwyższego dostępnego schematu modulacji przewidzianego dla co najmniej jednego systemu w co najmniej jednym paśmie częstotliwości, a tym samym maksymalne dostępne zasoby nie będą dostępne na obszarze całego sektora. Z punktu widzenia analizy pojemnościowej i wprowadzenia w zakładce ***Bilans łącza radiowego*** współczynników określających rzeczywiste wykorzystanie zasobów systemów, sytuacja ta jest dopuszczalna i w żaden sposób nie dyskwalifikuje dalszych kroków analizy.
- Czerwone pole z tekstem „Za duży" oznacza, że wprowadzona wartość R_{BS} jest większa niż maksymalna wymagana wartość zasięgu Best Server, wyznaczana dla danej konfiguracji sektora, uwzględniająca najniższy zdefiniowany dla danego systemu schemat modulacji. Sytuacja ta oznacza, że na granicy komórki użytkownicy nie będą mogli wykorzystywać minimalnych zasobów co najmniej jednego systemu w co najmniej jednym paśmie częstotliwości. Konfiguracja taka jest niedopuszczalna i dyskwalifikuje na starcie dalsze wyniki analizy pojemnościowej.

Zakładka ***Bilans pojemności*** zwiera również założenia ruchowe definiowane niezależnie dla poszczególnych środowisk propagacyjnych, obejmujące m.in. zapotrzebowanie na dane, wymaganą

szybkość transmisji oraz aktywność użytkownika i usługi. Punkt wyjścia stanowi przyjęty model przyrostu ruchu, opisany w poprzednim rozdziale, który pozwala wyznaczyć średni spodziewany miesięczny ruch w [GB] przypadający na pojedynczego użytkownika sieci w poszczególnych latach. Wartość ta jest dzielona przez, zdefiniowaną w zakładce *Bilans łącza radiowego*, liczbę dni w miesiącu przyjętą do wyznaczenia ruchu dziennego. Następnie określa się średni ruch w [MB/h] przypadający na godzinę największego ruchu (GNR), który stanowi odpowiedni procent ruchu dziennego. Średnia szybkość transmisji w GNR obliczana jest na podstawie zależności:

$$R_{GNR\ AVG}[Mbps] = \frac{Ruch\ w\ GNR\ [MB/h] \cdot 8[\mathrm{b/B}]}{3600\ [s/h]} \tag{10}$$

W kolejnym kroku należy założyć wielkość generowanego przez użytkowników ruchu w analizowanej sieci. Przedstawiona w raporcie analiza opiera się na założeniu realizacji usług VIDEO, które w 2025 roku będą dominowały. Przyjęto, że terminale będą generowały ruch na poziomie 0,25 Erlanga w GNR, co odpowiada następującemu schematowi transmisji: urządzenie przesyła dane 5 razy w ciągu godziny przy czym transmisja za każdym razem trwa 180 sekund. Dodatkowo przyjęto aktywność transmisji danych wynikającą z aktywności usługi oraz użytkownika w trakcie korzystania z niej na poziomie 90%. Chwilowa szybkość transmisji danych w GNR będzie zatem wynosić:

$$\mathrm{R_{GNR\ MAX}}[Mbps] = \mathrm{R_{GNR\ AVG}}[Mbps] \cdot \frac{3600\ [\mathrm{s}]}{90\% \cdot 5 \cdot 180\ [\mathrm{s}]} \tag{11}$$

czyli będzie ok. 4,44 razy większa od wartości średniej. Do dalszej analizy przyjmuje się, że maksymalna szybkość transmisji dla pojedynczego urządzenia jest zarazem minimalną przepustowością wymaganą do realizacji transmisji danych i w analizie Erlang C oznacza 1 kanał (N=1). Następnie porównuje się tę szybkość z wymaganą przepływnością dla usługi i większą z nich przyjmuje się jako wymaganą minimalną przepływność na granicy sektora. W kolejnym kroku porównuje się tę przepływność z minimalną łączną dostępną przepływnością sieci 4G/5G na granicy sektora, wyznaczoną w zakładce *Konfiguracja sektora*. Jeżeli minimalna przepływność na granicy sektora w danym środowisku jest wystarczająca do realizacji założonej usługi (weryfikacja usługowa), to wówczas można przejść do kolejnego kroku - analizy pojemnościowej.

Arkusz kalkulacyjny z modelem pojemnościowym ma zintegrowaną bibliotekę umożliwiającą automatyczne wyznaczanie wymaganych zasobów systemu na podstawie modelu Erlang-C [39, 40]. Wyniki uzyskiwane z wykorzystaniem tego modelu są bliższe rzeczywistości niż te wyznaczane na podstawie modelu erlang B, który w dawałby w tej sytuacji zawyżone wyniki. Zakłada on bowiem, blokowanie zgłoszeń i generalnie wykorzystywany jest w analizie pojemnościowej dla standardowych usług głosowych, natomiast dla usług transmisji danych, w których występuje kolejkowanie, preferowanym modelem jest Erlang C. Analiza pojemnościowa wykonuje się automatycznie i przebiega następująco. Na podstawie danych z zakładki *Dane GUS* wyznaczana jest gęstość urządzeń na km^2 w poszczególnych latach dla każdego rozpatrywanego obszaru/środowiska (kolumny AG-AN). Liczbę tych urządzeń można dodatkowo zmodyfikować za pomocą parametru zdefiniowanego jako udział i znajdującego się w kolumnie AF. Domyślna wartość tego parametru to 100% i oznacza ona, że model zakłada statystyczny rozkład urządzeń na podstawie danych z GUS. Zwiększenie tej liczby do 200% będzie oznaczało przyjęcie do dalszej analizy 2 razy więcej urządzeń przypadających na 1 km^2 danego obszaru, a zmniejszenie do 50% będzie oznaczało zmniejszenie tej liczby o połowę. Zestawiając ze sobą gęstość urządzeń na km^2 oraz wyznaczony obszar sektora w warstwie mikro w kolumnach BM-BT prezentowane są dodatkowo wynikowe liczby urządzeń przypadających na pojedynczy sektor. Na podstawie gęstości urządzeń oraz zdefiniowanych parametrów ruchu

wyznaczana jest następnie liczba wymaganych kanałów (zasobów) N (kolumny AS-AZ). Z kolei na podstawie łącznych zasobów rzeczywistych pojedynczego sektora w danym środowisku oraz na podstawie minimalnej przepustowości wymaganej do realizacji transmisji danych (oznaczającej 1 kanał), wyznacza się dostępną liczbę kanałów (zasobów) N (kolumny BC-BJ). W kolejnym kroku porównuje się zasoby wymagane i dostępne, a wynik tego porównania w postaci ilorazu podawany w procentach stanowi właściwy wynik analizy pojemnościowej (kolumny W:AD). Dane prezentujące procentowe pokrycie zapotrzebowania na zdefiniowany ruch dla rozpatrywanych obszarów w różnych środowiskach propagacyjnych i w poszczególnych latach dodatkowo oznaczono w sposób automatyczny kolorami zielonym i czerwonym. Kolor zielony i wartości 100% i powyżej oznaczają przypadki wystarczającej ilości zasobów w analizowanym systemie (dostępne zasoby są większe lub równe od wymaganych), a kolor czerwony i wartości poniżej 100% reprezentują przypadki, gdy zasoby są niewystarczające (dostępne zasoby są mniejsze od wymaganych).

Zakładając, że w modelu wprowadzono poprawnie wszystkie parametry systemowe oraz założenia ruchowe, można przystąpić do właściwej analizy pojemnościowej. W pierwszej kolejności definiuje się konfigurację systemów które są wykorzystywane w poszczególnych typach środowisk propagacyjnych. Następnie określa się zasięgi R_{BS}, które determinują rozstawienie stacji bazowych w danym obszarze. Jeżeli przyjęte wartości zasięgów są poprawne i minimalna przepływność na granicy sektora w danym środowisku jest wystarczająca do realizacji założonej usługi, to wówczas można przejść do kolejnego kroku, którym jest weryfikacja, czy wynikowe zasoby są wystarczające czy nie do realizacji zdefiniowanych w modelu usług w poszczególnych latach. W kolejnych iteracjach można zmieniać konfiguracje wykorzystywanych systemów i/lub zmieniać zasięgi R_{BS} i jeżeli oba poziomy weryfikacji zasięgowej i usługowej będą spełnione można ponownie weryfikować zasoby analizowanej sieci.

4. Wyniki analizy pojemnościowej

W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione wyniki przeprowadzonych analiz pojemnościowych dla różnych przypadków. Na wstępie należy zaznaczyć, że zaprezentowane w tym rozdziale wyniki prezentują wymagane zasoby sieci niezbędne do obsługi założonego poziomu ruchu w poszczególnych środowiskach w kolejnych latach i nie uwzględniają one ograniczeń wynikających z przyjętych wielkości PEM w Polsce, w tym ograniczeń dla możliwości instalacji nowych pasm częstotliwości lub implementacji rozwązań opartych o mikro i piko komórki. Prezentowane poniżej wyniki stanowić będą wsad do realizacji kolejnego (odrębnego) zadania, które będzie polegało na przeprowadzeniu analizy symulacyjnej rozkładu gęstości promieniowania mocy obejmującej w szczególności porównanie z przyjętymi wielkościami PEM dla każdego z analizowanych typów terenu i odpowiadającej mu zabudowy.

4.1. Założenia wstępne

Przed przystąpieniem do analizy pojemnościowej ustalono i zatwierdzono w trakcie cyklicznych spotkań z operatorami sieci komórkowych, przedstawione w poniższych tabelach parametry wejściowe modelu.

Tabela 7. Parametry przyjęte do analizy bilansu łącza radiowego

System	3G	4G	5G
Stacja Bazowa			
Wysokość stacji bazowej [m n.p.t.]			
Rural	45	45	45
Suburban	42	42	42
Urban	32	32	32
Dense Urban	26	26	26
Moc promieniowana EIRP [dBm]			
Rural	63	63	63
Suburban	63	63	63
Urban	63	63	63
Dense Urban	63	63	63
Korekta mocy wynikająca z różnej szerokości pasma			
5 MHz		0	0
10 MHz		0	0
15 MHz		0	0
20 MHz		0	0
Terminal			
Wysokość odbiornika	1,5	1,5	1,5
Zysk anteny odbiorczej SR [dBi]	0	0	0
Odbiór zbiorczy [dB]	0	3	6
Tłumienie doprowadzeń [dB]	0	0	0
Parametry systemowe			
Margines na interferencje [dB]	7,0	0	0
CEP [%]	80%	80%	80%
Margines systemowy [dB]	4,6	4,6	4,6
Rzeczywiste wykorzystanie zasobów	35%	35%	50%

Na potrzeby dalszej analizy przyjęto, że każda stacja bazowa składa się z 3 sektorów.

Tabela 8a. Wyznaczone na podstawie bilansu łącza radiowego oraz modelu Okumura-Hata zasięgi stacji bazowych analizowanych systemów w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Pasmo częstotliwości [MHz]	700				800				900				1800			
Szerokość kanału [MHz]	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
HSPA+ @ 64QAM																
Rural									22,6							
Suburban									6,2							
Urban									2,8							
Dense Urban									2,5							
HSPA+ @ QPSK																
Rural									64,3							
Suburban									17,5							
Urban									7,7							
Dense Urban									6,9							
LTE @ QPSK																
Rural	45,5	37,1	33,0	30,3	45,6	37,2	33,0	30,3	40,2	32,8	29,2	26,8	26,2	21,3	18,9	17,4
Suburban	12,8	10,4	9,3	8,5	12,6	10,3	9,2	8,4	11,0	9,0	8,0	7,3	6,5	5,3	4,7	4,3
Urban	5,9	4,8	4,3	4,0	5,7	4,7	4,2	3,8	4,9	4,0	3,6	3,3	2,6	2,1	1,9	1,7
Dense Urban	5,3	4,3	3,9	3,6	5,1	4,2	3,7	3,5	4,4	3,6	3,2	3,0	1,9	1,6	1,4	1,3
LTE @ 64QAM																
Rural	17,8	14,5	12,9	11,8	17,8	14,5	12,9	11,9	15,7	12,8	11,4	10,5	10,2	8,3	7,4	6,8
Suburban	5,0	4,1	3,6	3,3	5,0	4,1	3,6	3,3	4,3	3,5	3,1	2,9	2,6	2,1	1,9	1,7
Urban	2,4	1,9	1,7	1,6	2,3	1,9	1,7	1,5	2,0	1,6	1,4	1,3	1,0	0,8	0,8	0,7
Dense Urban	2,1	1,8	1,6	1,5	2,1	1,7	1,5	1,4	1,8	1,5	1,3	1,2	0,8	0,6	0,6	0,5
LTE @ 256QAM																
Rural	10,8	8,8	7,8	7,2	10,8	8,8	7,8	7,2	9,5	7,8	6,9	6,4	6,2	5,1	4,5	4,1
Suburban	3,1	2,5	2,2	2,0	3,0	2,5	2,2	2,0	2,6	2,1	1,9	1,8	1,6	1,3	1,1	1,0
Urban	1,5	1,2	1,1	1,0	1,4	1,2	1,0	0,9	1,2	1,0	0,9	0,8	0,6	0,5	0,5	0,4
Dense Urban	1,3	1,1	1,0	0,9	1,3	1,1	0,9	0,9	1,1	0,9	0,8	0,7	0,5	0,4	0,4	0,3
5G @ QPSK																
Rural	55,7	45,5	40,4	37,1	55,8	45,5	40,4	37,2	49,3	40,2	35,7	32,8	32,0	26,1	23,2	21,3
Suburban	15,6	12,8	11,3	10,4	15,4	12,6	11,2	10,3	13,5	11,0	9,8	9,0	8,0	6,5	5,8	5,3
Urban	7,2	5,9	5,2	4,8	6,9	5,7	5,1	4,7	5,9	4,9	4,3	4,0	3,1	2,6	2,3	2,1
Dense Urban	6,4	5,3	4,7	4,3	6,2	5,1	4,5	4,2	5,3	4,4	3,9	3,6	2,3	1,9	1,7	1,6
5G @ 256QAM																
Rural	13,2	10,8	9,6	8,8	13,2	10,8	9,6	8,8	11,7	9,5	8,5	7,8	7,6	6,2	5,5	5,1
Suburban	3,7	3,1	2,7	2,5	3,7	3,0	2,7	2,5	3,2	2,6	2,3	2,1	1,9	1,6	1,4	1,3
Urban	1,8	1,5	1,3	1,2	1,7	1,4	1,2	1,2	1,5	1,2	1,1	1,0	0,8	0,6	0,6	0,5
Dense Urban	1,6	1,3	1,2	1,1	1,6	1,3	1,1	1,1	1,3	1,1	1,0	0,9	0,6	0,5	0,4	0,4

Tabela 8b. Wyznaczone na podstawie bilansu łącza radiowego oraz modelu COST Hata zasięgi stacji bazowych analizowanych systemów w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Pasmo częstotliwości [MHz]	2100				2600				3600			
Szerokość kanału [MHz]	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
HSPA+ @ 64QAM												
Rural	13,4											
Suburban	3,3											
Urban	1,3											
Dense Urban	1,0											
HSPA+ @ QPSK												
Rural	38,1											
Suburban	9,2											
Urban	3,5											
Dense Urban	2,6											
LTE @ QPSK												
Rural	29,2	23,8	21,1	19,4	22,5	18,3	16,3	15,0	21,5	17,6	15,6	14,3
Suburban	7,1	5,8	5,1	4,7	5,3	4,3	3,8	3,5	4,7	3,9	3,4	3,1
Urban	2,7	2,2	2,0	1,8	1,9	1,6	1,4	1,3	1,6	1,3	1,2	1,1
Dense Urban	2,0	1,7	1,5	1,4	1,4	1,2	1,1	1,0	1,2	1,0	0,9	0,8
LTE @ 64QAM												
Rural	11,4	9,3	8,3	7,6	8,8	7,2	6,4	5,9	8,4	6,9	6,1	5,6
Suburban	2,8	2,3	2,0	1,9	2,1	1,7	1,5	1,4	1,9	1,5	1,3	1,2
Urban	1,1	0,9	0,8	0,7	0,8	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4
Dense Urban	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3
LTE @ 256QAM												
Rural	6,9	5,6	5,0	4,6	5,3	4,3	3,9	3,5	5,1	4,2	3,7	3,4
Suburban	1,7	1,4	1,2	1,1	1,3	1,0	0,9	0,8	1,1	0,9	0,8	0,8
Urban	0,7	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
Dense Urban	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
5G @ QPSK												
Rural	35,7	29,2	25,9	23,8	27,5	22,5	20,0	18,3	26,3	21,5	19,1	17,5
Suburban	8,7	7,1	6,3	5,8	6,4	5,3	4,7	4,3	5,8	4,7	4,2	3,8
Urban	3,3	2,7	2,4	2,2	2,3	1,9	1,7	1,6	1,9	1,6	1,4	1,3
Dense Urban	2,4	2,0	1,8	1,6	1,7	1,4	1,3	1,2	1,5	1,2	1,1	1,0
5G @ 256QAM												
Rural	8,5	6,9	6,1	5,6	6,5	5,3	4,7	4,3	6,2	5,1	4,5	4,2
Suburban	2,1	1,7	1,5	1,4	1,5	1,3	1,1	1,0	1,4	1,1	1,0	0,9
Urban	0,8	0,7	0,6	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3
Dense Urban	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2

Tabela 9. Parametry przyjęte do analizy podstawowych zasobów poszczególnych systemów

	3G		4G			5G	
	Granica zasięgu	Zasoby sieci	Granica zasięgu	Zasoby sieci		Granica zasięgu	Zasoby sieci
Modulacja	**QPSK**	**64QAM**	**QPSK**	**64QAM**	**256QAM**	**QPSK**	**256QAM**
Sprawność kodowania	0,76	0,98	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Wynikowa efektywność transmisji danych			0,64	0,64	0,64	0,64	0,64
Wymagane SNR [dB]	5	19	6,2	18,6	25	6,2	25
Noise Figure NF [dB]	7	7	7	7	7	7	7
Spreading Factor	16	16					
Zysk przetwarzania [dB]	12	12					
Implementation Margin IM [dB]	2,5	4	2,5	4	5	2,5	5
Liczba bitów na symbol modulacyjny	2	6	2	6	8	2	8
Max liczba kodów użytych w kanale transportowym	15	15					
Szerokość kanału	**Zasoby sieci DL [Mbps]**						
5 MHz	5,5	21,1	5,1	15,4	20,5	12,8	51,3
10 MHz			10,3	30,8	41,0	25,6	102,5
15 MHz			15,4	46,1	61,5	38,5	153,8
20 MHz			20,5	61,5	82,0	51,3	205,1

We wszystkich rozpatrywanych typach środowisk propagacyjnych zdecydowano się wykorzystać ten sam model popytowy na ruch w sieci oraz taką samą liczbę urządzeń per capita.

Tabela 10. Parametry ruchowe przyjęte do analizy pojemnościowej sieci

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Ruch miesięczny [GB]	8,2	11,4	16,0	22,4	31,4	44,0	61,6	86,2
Ruch dzienny [MB]	322	451	631	884	1237	1732	2425	3394
Ruch w GNR [%]	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Ruch w GNR [MB/h]	48,3	67,6	94,7	132,5	185,6	259,8	363,7	509,2
Średnia szybkość transmisji w GNR [Mbps]	0,107	0,150	0,210	0,295	0,412	0,577	0,808	1,131
Aktywność użytkownika i usługi	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%
Wymagana przepływność [Mbps] dla N=1	**0,477**	**0,668**	**0,935**	**1,309**	**1,833**	**2,566**	**3,592**	**5,029**
Liczba połączeń w ciągu godziny	5	5	5	5	5	5	5	5
Czas trwania jednego połączenia [s]	180	180	180	180	180	180	180	180
Ruch generowany A przez jednego użytkownika [Erl]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Procent oczekujących [%]	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabela 11. Parametry przyjęte do wyznaczenia liczby urządzeń mobilnych w poszczególnych latach

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba urządzeń per capita	2,98	3,25	3,54	3,86	4,22	4,60	5,02	5,47
Udział smartfonów [%]	21,7%	22,1%	22,5%	22,8%	23,2%	23,6%	24,0%	24,4%
Udział tabletów [%]	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Udział innych urządzeń mobilnych [%]	1,7%	1,7%	1,7%	1,8%	1,8%	1,8%	1,9%	1,9%
Liczba urządzeń mobilnych per capita	**0,79**	**0,87**	**0,96**	**1,07**	**1,07**	**1,07**	**1,07**	**1,07**

Na podstawie danych GUS [7, 25] oraz opisanych poprzednio założeń dot. m.in. zwiększonej liczby użytkowników w środowisku wielkomiejskim, dokonano stosownych obliczeń podziału liczby ludności na poszczególne środowiska propagacyjne, które zaprezentowano poniżej.

Tabela 12. Liczba ludności w Polsce i poszczególnych miastach z podziałem na poszczególne środowiska propagacyjne

	Powierzchnia [km2]	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Polska	**312 679**	**38 259 532**	**38 200 552**	**38 137 804**	**38 070 314**	**37 997 408**	**37 918 575**	**37 833 310**	**37 741 462**
Rural	193 861,0	10 712 669	10 696 155	10 678 585	10 659 688	10 639 274	10 617 201	10 593 327	10 567 609
Suburban	103 184,1	8 799 692	8 786 127	8 771 695	8 756 172	8 739 404	8 721 272	8 701 661	8 680 536
Urban	143 83,2	14 92 1217	14 898 215	14 873 744	14 847 422	14 818 989	14 788 244	14 754 991	14 719 170
Dense Urban	1 250,7	1121 0043	11 192 762	11 174 377	11 154 602	11 133 241	11 110 142	11 085 160	11 058 248
Warszawa	**517**	**1 773 323**	**1 782 288**	**1 790 708**	**1 798 514**	**1 805 659**	**1 812 176**	**1 818 059**	**1 823 356**
Suburban	449,0	566 478	569 342	572 032	574 525	576 808	578 890	580 769	582 461
Urban	62,6	960 550	965 406	969 967	974 195	978 065	981 595	984 782	987 651
Dense Urban	5,4	721 644	725 292	728 719	731 895	734 803	737 455	739 849	742 005
Kraków	**327**	**770 250**	**772 401**	**774 317**	**775 967**	**777 343**	**778 425**	**779232**	**779 746**
Suburban	284,0	246 052	246 739	247 351	247 878	248 318	248664	248 921	249 086
Urban	39,6	417 219	418 384	419 422	420 315	421 061	421 647	422 084	422 362
Dense Urban	3,4	313 449	314 324	315 104	315 775	316 335	316776	317 104	317 313
Łódź	**293**	**686 545**	**681 434**	**676 244**	**670 963**	**665 610**	**660 179**	**654 681**	**649 127**
Suburban	254,4	219 313	217 680	216 022	214 335	212 625	210 891	209 134	207 360
Urban	35,5	371 879	369 110	366 299	363 438	360 539	357 597	354 619	351 610
Dense Urban	3,1	279 386	277 306	275 194	273 045	270 866	268 656	266 419	264 159
Wrocław	**292**	**641 178**	**642 742**	**644 170**	**645 416**	**646495**	**647 362**	**648 050**	**648 566**
Suburban	253,6	204 821	205 320	205 777	206 175	206 519	206 796	207 016	207 181
Urban	35,3	347 305	348 152	348 925	349 600	350185	350 654	351 027	351 307
Dense Urban	3,1	260 924	261 560	262 141	262 648	263 088	263 440	263 720	263 930
Gdańsk	**262**	**466 758**	**468 027**	**469 146**	**470 105**	**470 907**	**471536**	**472 004**	**472 332**
Suburban	227,5	149 103	149 509	149 866	150 172	150 429	150 630	150 779	150 884
Urban	31,7	252 827	253 515	254 121	254 640	255 075	255415	255 669	255 847
Dense Urban	2,8	189 945	190 461	190 916	191 307	191 633	191 889	192 079	192 213
Poznań	**262**	**536 898**	**534 979**	**532 894**	**530 663**	**528 260**	**525 695**	**522 952**	**520057**
Suburban	227,5	171 509	170 896	170 230	169 517	168 750	167 930	167 054	166 129
Urban	31,7	290 820	289 780	288 651	287 442	286141	284 751	283 266	281 698
Dense Urban	2,8	218 488	217 707	216 858	215 950	214 972	213 929	212 812	211 634
Bydgoszcz	**176**	**350 456**	**348 631**	**346 758**	**344 830**	**342 825**	**340 752**	**338 612**	**336 415**
Suburban	154,5	130 008	129 331	128 636	127 921	127 177	126 408	125 614	124 799
Urban	21,5	220 448	219 300	218 122	216 909	215 648	214 344	212 998	211 616
Katowice	**165**	**293 516**	**291 191**	**288 839**	**286 450**	**284 009**	**281 529**	**279 014**	**276 462**
Suburban	143,0	93 762	93 019	92 268	91 505	90 725	89 933	89 129	88 314
Urban	19,9	158 988	157 728	156 454	155 160	153 838	152 495	151 133	149 750
Dense Urban	1,7	119 445	118 499	117 541	116 569	115 576	114 567	113 543	112 505

Na podstawie powyższych danych przeprowadzono analizę pojemnościową dla przypadku ogólnego całej Polski (który odpowiada małym i średnim miastom) oraz dla przypadków szczególnych – dla wybranych dużych miast.

Zgodnie z przyjętymi założeniami analiza pojemnościowa została przeprowadzona dla następujących scenariuszy:

- Utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości,
- Dołożenie warstwy nośnej 700 MHz,
- Dołożenie potencjalnych nowych warstw nośnych 700 MHz, 2.6 GHz, 3.4-3.8 GHz,
- Umożliwienie budowy sieci mikro- oraz piko-komórek.

Wyniki przeprowadzonych analiz zostały przedstawione w kolejnych punktach tego rozdziału.

4.2. Analiza uwzględniająca utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości

Na podstawie danych uzyskanych od operatorów sieci komórkowych przyjętą tzw. „dobrą" (obecną) konfigurację stacji bazowych dla warstw mikro i makro, która została przedstawiona w poniższej tabeli. Założono, że wszystkie systemy wykorzystują technologię MIMO 2x2.

Tabela 13. Przyjęta konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO		
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz	5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz	5 MHz
LTE 700						
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz	10 MHz
LTE 900						
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz	20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz	
LTE 3600[10]						

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które z kolei przedstawiono poniżej.

Tabela 14. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji przy uwzględnieniu schematu modulacji 64 QAM oraz konfiguracji MIMO 2x2 dla sieci LTE

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
	Mikro	Makro	Mikro	Makro		
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,397	1,708	0,519	1,873	1,379	6,806
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510	17,413
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	391,9	61,5	391,9	61,5	453,5	330,4
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	137,2	21,5	137,2	21,5	158,7	115,6
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	35,9	7,2	35,9	7,2	43,1	28,7

Ponieważ analizowany scenariusz zakłada utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, założono, że potencjalna rozbudowa sieci będzie dotyczyła wprowadzenia wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Przyjęcie takich założeń wpływa na zasięgi i zasoby stacji bazowych, więc poniższa tabela prezentuje te dane dla rozpatrywanej konfiguracji.

Tabela 15. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji przy uwzględnieniu schematu modulacji 256 QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 dla sieci LTE

[10] Oznaczenie LTE 3600 odnosi się do całego zakresu pasma częstotliwości 3.4-3.8 GHz

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
	Mikro	Makro	Mikro	Makro		
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,246	1,059	0,319	1,151	0,839	4,128
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510	17,413
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	904,6	164,1	904,6	164,1	1068,7	740,6
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	316,6	57,4	316,6	57,4	374,0	259,2
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	71,8	14,4	71,8	14,4	86,1	57,4

4.2.1. Polska – przypadek ogólny

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla terenu całej Polski, który odpowiada małym i średnim miastom. Poniższe tabele przedstawiają przyjęte założenia dot. liczby urządzeń, konfiguracje stacji bazowych oraz wyniki analizy pojemnościowej.

Tabela 16. Liczba urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Polska	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Rural	43	48	53	59	59	59	58	58
Suburban	67	74	82	91	91	90	90	90
Urban	814	901	996	1101	1102	1100	1098	1095
Dense Urban	7037	7783	8606	9516	9525	9505	9483	9460

Wartości R_{BS} przyjęto na podstawie danych przekazanych przez operatorów sieci komórkowych i wynikają one z podzielenia obszaru danego typu środowiska przez liczbę stacji bazowych wszystkich operatorów w tym środowisku, przy założeniu ok. 20% wspólnych lokalizacji.

Tabela 17. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla stanu aktualnego

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Polska	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Rural	3,500	OK	3				**26,7**	**9,3**
Suburban	2,000	Dopuszczalne	3				**112,2**	**39,3**
Urban	0,700	Dopuszczalne	3	1,200	OK	3	**940,4**	**329,1**
Dense Urban	0,300	OK	3	0,500	OK	3	**5 130,9**	**1 795,8**

Tabela 18. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku ogólnego Polski dla obecnej konfiguracji stacji bazowych

Polska	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Rural	19	21	22	24	24	24	24	24
Suburban	27	29	32	34	34	34	34	34
Urban	235	258	284	312	312	312	311	310
Dense Urban	1850	2041	2251	2484	2486	2481	2475	2470
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Rural	19	13	9	7	5	3	2	1
Suburban	82	58	42	30	21	15	10	7
Urban	689	492	352	251	179	128	91	65
Dense Urban	3764	2688	1920	1371	979	699	499	357
Bilans pojemności								
Rural	100%	62%	41%	29%	21%	13%	8%	4%
Suburban	304%	200%	131%	88%	62%	44%	29%	21%
Urban	293%	191%	124%	80%	57%	41%	29%	21%
Dense Urban	203%	132%	85%	55%	39%	28%	20%	14%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że obecnie wykorzystywane zasoby w środowisku wiejskim pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci tylko w bieżącym roku. Oznacza to, konieczność zwiększenia zasobów w tych obszarach jeszcze w 2018 roku w celu utrzymania założonej jakości obsługi abonentów. Z kolei w środowisku podmiejskim, obecne zasoby sieci pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu do roku 2020 i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w okresie 2 lat. Podobnie sytuacja wygląda w środowisku miejskim. Z kolei w środowisku wielkomiejskim obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego ruchu do 2019 roku i niezbędne do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów zasoby będą musiały zostać uruchomione w przeciągu roku.

W ramach niniejszego scenariusza przeanalizowano przypadek rozbudowy sieci polegający na wprowadzeniu wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano poniżej.

Tabela 19. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby uwzględniające wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Polska	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Rural	3,500	OK	3				**59,8**	**20,9**
Suburban	2,000	Dopuszczalne	3				**264,4**	**92,6**
Urban	0,700	Dopuszczalne	3	1,200	Dopuszczalne	3	**2 176,6**	**761,8**
Dense Urban	0,300	Dopuszczalne	3	0,500	OK	3	**11 879,3**	**4 157,8**

Tabela 20. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

Polska	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Rural	43	31	22	15	11	8	5	4
Suburban	194	138	98	70	50	36	25	18
Urban	1596	1140	814	581	415	296	212	151
Dense Urban	8715	6225	4446	3176	2268	1620	1157	826
Bilans pojemności								
Rural	226%	148%	100%	63%	46%	33%	21%	17%
Suburban	719%	476%	306%	206%	147%	106%	74%	53%
Urban	679%	442%	287%	186%	133%	95%	68%	49%
Dense Urban	471%	305%	198%	128%	91%	65%	47%	33%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej rozbudowy sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 2-3 lat, jednak nie zapewni utrzymania założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w zależności od typu środowiska propagacyjnego, w okresie najbliższych 2-5 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G.

4.2.2. Warszawa

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Warszawy. Poniższe tabele przedstawiają przyjęte założenia dot. liczby urządzeń, konfiguracje stacji bazowych oraz wyniki analizy pojemnościowej.

Tabela 21. Liczba urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Warszawa	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Suburban	991	1 103	1 227	1 365	1 375	1 380	1 384	1 388
Urban	12 050	13 415	14 930	16 610	16 722	16 782	16 837	16 886
Dense Urban	104 111	115 901	128 988	143 504	144 473	144 995	145 465	145 889

Wartości R_{BS} dla miasta Warszawy przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów.

Tabela 22. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla stanu aktualnego

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Warszawa	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,500	OK	3				**2 094,5**	**733,1**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**11 503,8**	**40 26,3**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**45 701,8**	**15 995,6**

Tabela 23. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Warszawy dla obecnej konfiguracji stacji bazowych

Warszawa	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	282	312	345	382	384	386	387	388
Urban	3 130	3 478	3 863	4 290	4 319	4 334	4 348	4 361
Dense Urban	26 371	29 337	32 629	36 278	36 522	36 653	36 772	36 878
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	1536	1097	784	560	400	285	204	145
Urban	8440	6028	4306	3075	2197	1569	1120	800
Dense Urban	33530	23950	17107	12219	8728	6234	4453	3180
Bilans pojemności								
Suburban	545%	352%	227%	147%	104%	74%	53%	37%
Urban	270%	173%	111%	72%	51%	36%	26%	18%
Dense Urban	127%	82%	52%	34%	24%	17%	12%	9%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku Warszawy obecnie wykorzystywane zasoby w środowisku podmiejskim pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu do roku 2022 i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w okresie 4 lat. W przypadku środowiska miejskiego obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego ruchu do 2020 roku i niezbędne do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów zasoby będą musiały zostać uruchomione w okresie 2 lat. Z kolei w przypadku

środowiska wielkomiejskiego obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci tylko w bieżącym roku. Oznacza to, konieczność zwiększenia zasobów w tym obszarze jeszcze w 2018 roku w celu utrzymania założonej jakości obsługi abonentów.

W ramach niniejszego scenariusza przeanalizowano przypadek rozbudowy sieci polegający na wprowadzeniu wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano poniżej.

Tabela 24. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby uwzględniające wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Warszawa	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,500	OK	3				**4 936,1**	**1 727,6**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**26 619,6**	**9 316,9**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**105 642,7**	**36 975,0**

Tabela 25. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

Warszawa	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	3621	2586	1847	1319	942	673	480	343
Urban	19530	13950	9964	7117	5083	3631	2593	1852
Dense Urban	77507	55362	39544	28246	20175	14411	10293	7352
Bilans pojemności								
Suburban	1284%	829%	535%	345%	245%	174%	124%	88%
Urban	624%	401%	258%	166%	118%	84%	60%	42%
Dense Urban	294%	189%	121%	78%	55%	39%	28%	20%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej rozbudowy sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 2 lata, jednak nie zapewni utrzymania założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w zależności od typu środowiska propagacyjnego, w okresie najbliższych 2-6 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G w Warszawie.

4.2.3. Kraków

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Krakowa. Poniższe tabele przedstawiają przyjęte założenia dot. liczby urządzeń, konfiguracje stacji bazowych oraz wyniki analizy pojemnościowej.

Tabela 26. Liczba urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Kraków	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Suburban	680	756	839	931	936	937	938	939
Urban	8275	9192	10207	11330	11382	11398	11409	11417
Dense Urban	71496	79414	88183	97889	98335	98472	98574	98639

Wartości R_{BS} dla miasta Krakowa przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów.

Tabela 27. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla stanu aktualnego

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Kraków	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,750	OK	3				**930,9**	**325,8**
Urban	0,250	OK	3	0,400	OK	3	**7 414,7**	**2 595,1**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**45 701,8**	**15 995,6**

Tabela 28. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Krakowa dla obecnej konfiguracji stacji bazowych

Kraków	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	199	220	242	267	268	268	268	269
Urban	2167	2401	2660	2947	2960	2964	2967	2969
Dense Urban	18159	20153	22362	24805	24917	24952	24977	24994
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	682	487	348	248	177	126	90	64
Urban	5439	3885	2775	1982	1416	1011	722	516
Dense Urban	33530	23950	17107	12219	8728	6234	4453	3180
Bilans pojemności								
Suburban	343%	221%	144%	93%	66%	47%	34%	24%
Urban	251%	162%	104%	67%	48%	34%	24%	17%
Dense Urban	185%	119%	77%	49%	35%	25%	18%	13%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku Krakowa obecnie wykorzystywane zasoby w środowisku podmiejskim pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu do roku 2020 i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w przeciągu 2 lat. Tak samo sytuacja wygląda w przypadku środowiska miejskiego. Z kolei w przypadku środowiska wielkomiejskiego obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę

założonego poziomu ruchu w sieci do 2019 roku, co oznacza, że niezbędne do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów zasoby będą musiały zostać uruchomione w przeciągu roku.

W ramach niniejszego scenariusza przeanalizowano przypadek rozbudowy sieci polegający na wprowadzeniu wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano poniżej.

Tabela 29. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby uwzględniające wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Kraków	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,750	OK	3				**2 193,8**	**767,8**
Urban	0,250	OK	3	0,400	OK	3	**17 175,9**	**6 011,6**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**105 642,7**	**36 975,0**

Tabela 30. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

Kraków	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	1609	1149	821	586	418	299	213	152
Urban	12601	9001	6429	4592	3280	2343	1673	1195
Dense Urban	77507	55362	39544	28246	20175	14411	10293	7352
Bilans pojemności								
Suburban	809%	522%	339%	219%	156%	112%	79%	57%
Urban	581%	375%	242%	156%	111%	79%	56%	40%
Dense Urban	427%	275%	177%	114%	81%	58%	41%	29%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej rozbudowy sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 2-3 lata, jednak nie zapewni utrzymania założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w zależności od typu środowiska propagacyjnego, w okresie najbliższych 3-5 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G w Krakowie.

4.2.4. Łódź

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Łodzi. Poniższe tabele przedstawiają przyjęte założenia dot. liczby urządzeń, konfiguracje stacji bazowych oraz wyniki analizy pojemnościowej.

Tabela 31. Liczba urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Łódź	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Suburban	677	744	818	899	894	887	879	872
Urban	8232	9050	9948	10934	10877	10788	10698	10607
Dense Urban	71122	78191	85951	94465	93971	93204	92428	91644

Wartości R_{BS} dla miasta Łodzi przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów.

Tabela 32. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla stanu aktualnego

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Łódź	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	1,000	OK	3				**523,6**	**183,3**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**11 503,8**	**4 026,3**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**45 701,8**	**15 995,6**

Tabela 33. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Łodzi dla obecnej konfiguracji stacji bazowych

Łódź	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	198	216	236	258	257	255	253	251
Urban	2156	2365	2594	2846	2831	2808	2785	2762
Dense Urban	18064	19845	21800	23943	23819	23626	23430	23233
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	384	274	196	140	100	71	51	36
Urban	8440	6028	4306	3075	2197	1569	1120	800
Dense Urban	33530	23950	17107	12219	8728	6234	4453	3180
Bilans pojemności								
Suburban	194%	127%	83%	54%	39%	28%	20%	14%
Urban	391%	255%	166%	108%	78%	56%	40%	29%
Dense Urban	186%	121%	78%	51%	37%	26%	19%	14%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku Łodzi obecnie wykorzystywane zasoby w środowisku podmiejskim pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu do roku 2019 i tym samym niezbędne do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów zasoby będą musiały zostać uruchomione w przeciągu roku. Natomiast w przypadku środowiska miejskiego obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego ruchu do 2021 roku i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w okresie 3 lat. Z kolei w przypadku

środowiska wielkomiejskiego obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci do 2019 roku, co oznacza konieczność zwiększenia zasobów w tych obszarach w przeciągu roku.

W ramach niniejszego scenariusza przeanalizowano przypadek rozbudowy sieci polegający na wprowadzeniu wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano poniżej.

Tabela 34. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby uwzględniające wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Łódź	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	1,000	Dopuszczalne	3				**1 234,0**	**431,9**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**26 619,6**	**9 316,9**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**105 642,7**	**36 975,0**

Tabela 35. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

Łódź	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	905	646	461	329	235	168	120	85
Urban	19530	13950	9964	7117	5083	3631	2593	1852
Dense Urban	77507	55362	39544	28246	20175	14411	10293	7352
Bilans pojemności								
Suburban	457%	299%	195%	128%	91%	66%	47%	34%
Urban	906%	590%	384%	250%	180%	129%	93%	67%
Dense Urban	429%	279%	181%	118%	85%	61%	44%	32%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej rozbudowy sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 2-3 lata, jednak nie zapewni utrzymania założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w zależności od typu środowiska propagacyjnego, w okresie najbliższych 3-5 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G w Łodzi.

4.2.5. Wrocław

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Wrocławia. Poniższe tabele przedstawiają przyjęte założenia dot. liczby urządzeń, konfiguracje stacji bazowych oraz wyniki analizy pojemnościowej.

Tabela 36. Liczba urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km² w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Wrocław	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Suburban	634	704	782	868	871	873	874	874
Urban	7 714	8 566	9 509	10 553	10 600	10 615	10 626	10 634
Dense Urban	66 649	74 004	82 155	91 179	91 585	91 708	91 805	91 878

Wartości R_{BS} dla miasta Wrocławia przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów.

Tabela 37. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla stanu aktualnego

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Wrocław	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	1,000	OK	3				**523,6**	**183,3**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**11 503,8**	**4 026,3**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**45 701,8**	**15 995,6**

Tabela 38. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Wrocławia dla obecnej konfiguracji stacji bazowych

Wrocław	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	187	206	227	250	251	251	251	251
Urban	2023	2241	2482	2749	2761	2764	2767	2769
Dense Urban	16937	18790	20844	23116	23218	23249	23274	23292
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	384	274	196	140	100	71	51	36
Urban	8440	6028	4306	3075	2197	1569	1120	800
Dense Urban	33530	23950	17107	12219	8728	6234	4453	3180
Bilans pojemności								
Suburban	205%	133%	86%	56%	40%	28%	20%	14%
Urban	417%	269%	173%	112%	80%	57%	40%	29%
Dense Urban	198%	127%	82%	53%	38%	27%	19%	14%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku Wrocławia obecnie wykorzystywane zasoby w środowisku podmiejskim pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu do roku 2019 i niezbędne do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów zasoby będą musiały zostać uruchomione w przeciągu roku. W przypadku środowiska miejskiego obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego ruchu do 2021 roku i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w okresie 3 lat. Z kolei w przypadku środowiska

wielkomiejskiego obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci do 2019 roku, co oznacza konieczność zwiększenia zasobów w tych obszarach w przeciągu roku.

W ramach niniejszego scenariusza przeanalizowano przypadek rozbudowy sieci polegający na wprowadzeniu wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano poniżej.

Tabela 39. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby uwzględniające wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Wrocław	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	1,000	Dopuszczalne	3				**1 234,0**	**431,9**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**26 619,6**	**9 316,9**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**105 642,7**	**36 975,0**

Tabela 40. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

Wrocław	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	905	646	461	329	235	168	120	85
Urban	19530	13950	9964	7117	5083	3631	2593	1852
Dense Urban	77507	55362	39544	28246	20175	14411	10293	7352
Bilans pojemności								
Suburban	484%	314%	203%	132%	94%	67%	48%	34%
Urban	965%	622%	401%	259%	184%	131%	94%	67%
Dense Urban	458%	295%	190%	122%	87%	62%	44%	32%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej rozbudowy sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 2 lata, jednak nie zapewni utrzymania założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w zależności od typu środowiska propagacyjnego, w okresie najbliższych 3-5 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G we Wrocławiu.

4.2.6. Gdańsk

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Gdańska. Poniższe tabele przedstawiają przyjęte założenia dot. liczby urządzeń, konfiguracje stacji bazowych oraz wyniki analizy pojemnościowej.

Tabela 41. Liczba urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Gdańsk	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Suburban	515	571	634	704	707	708	709	710
Urban	6259	6951	7718	8567	8605	8617	8626	8632
Dense Urban	54074	60058	66684	74017	74349	74449	74522	74574

Wartości R_{BS} dla miasta Gdańska przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów.

Tabela 42. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla stanu aktualnego

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Gdańsk	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,500	OK	3				**2 094,5**	**733,1**
Urban	0,250	OK	3	0,400	OK	3	**7 414,7**	**2 595,1**
Dense Urban	0,125	OK	3	0,200	OK	3	**29 658,7**	**10 380,6**

Tabela 43. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Gdańska dla obecnej konfiguracji stacji bazowych

Gdańsk	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	154	170	187	206	207	207	207	207
Urban	1650	1828	2024	2241	2251	2254	2256	2258
Dense Urban	13766	15275	16946	18794	18877	18902	18921	18934
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	1536	1097	784	560	400	285	204	145
Urban	5439	3885	2775	1982	1416	1011	722	516
Dense Urban	21759	15542	11101	7929	5664	4045	2889	2064
Bilans pojemności								
Suburban	997%	645%	419%	272%	193%	138%	99%	70%
Urban	330%	213%	137%	88%	63%	45%	32%	23%
Dense Urban	158%	102%	66%	42%	30%	21%	15%	11%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku Gdańska obecnie wykorzystywane zasoby w środowisku podmiejskim pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu do roku 2023 i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w okresie 5 lat. Natomiast w przypadku środowiska miejskiego obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego ruchu do 2020 roku i niezbędne do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów zasoby będą musiały zostać uruchomione w okresie 2 lat. Z kolei w przypadku środowiska

wielkomiejskiego obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci tylko do 2019 roku, co oznacza konieczność zwiększenia zasobów w tych obszarach w przeciągu roku.

W ramach niniejszego scenariusza przeanalizowano przypadek rozbudowy sieci polegający na wprowadzeniu wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano poniżej.

Tabela 44. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby uwzględniające wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Gdańsk	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,500	OK	3				**4 936,1**	**1 727,6**
Urban	0,250	OK	3	0,40	OK	3	**17 175,9**	**6 011,6**
Dense Urban	0,125	OK	3	0,200	OK	3	**68 703,6**	**24 046,3**

Tabela 45. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

Gdańsk	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	3621	2586	1847	1319	942	673	480	343
Urban	12601	9001	6429	4592	3280	2343	1673	1195
Dense Urban	50406	36004	25717	18369	13121	9372	6694	4781
Bilans pojemności								
Suburban	2351%	1521%	988%	640%	455%	325%	232%	166%
Urban	764%	492%	318%	205%	146%	104%	74%	53%
Dense Urban	366%	236%	152%	98%	70%	50%	35%	25%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej rozbudowy sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 1-3 lat i w przypadku środowiska podmiejskiego zapewni utrzymanie założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w środowiskach miejskim i wielkomiejskim w okresie najbliższych 2-5 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G w Gdańsku.

4.2.7. Poznań

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Poznania. Poniższe tabele przedstawiają przyjęte założenia dot. liczby urządzeń, konfiguracje stacji bazowych oraz wyniki analizy pojemnościowej.

Tabela 46. Liczba urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km² w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Poznań	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Suburban	592	653	721	795	794	790	786	781
Urban	7199	7946	8767	9671	9654	9607	9557	9504
Dense Urban	62200	68649	75745	83552	83404	82999	82566	82109

Wartości R_{BS} dla miasta Poznania przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów.

Tabela 47. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla stanu aktualnego

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Poznań	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,750	OK	3				**930,9**	**325,8**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**11 503,8**	**4 026,3**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**45 701,8**	**15 995,6**

Tabela 48. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Poznania dla obecnej konfiguracji stacji bazowych

Poznań	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	175	192	210	230	230	229	228	226
Urban	1891	2082	2292	2523	2519	2507	2494	2481
Dense Urban	15815	17441	19229	21195	21158	21056	20947	20832
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	682	487	348	248	177	126	90	64
Urban	8440	6028	4306	3075	2197	1569	1120	800
Dense Urban	33530	23950	17107	12219	8728	6234	4453	3180
Bilans pojemności								
Suburban	390%	254%	166%	108%	77%	55%	39%	28%
Urban	446%	290%	188%	122%	87%	63%	45%	32%
Dense Urban	212%	137%	89%	58%	41%	30%	21%	15%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku Poznania obecnie wykorzystywane zasoby w środowisku podmiejskim pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu do roku 2021 i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w przeciągu 3 lat. Podobnie w przypadku środowiska miejskiego obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego ruchu do 2021 roku. Z kolei w przypadku środowiska wielkomiejskiego obecnie

wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci do 2019 roku, co oznacza konieczność zwiększenia zasobów w tych obszarach w przeciągu roku.

W ramach niniejszego scenariusza przeanalizowano przypadek rozbudowy sieci polegający na wprowadzeniu wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano poniżej.

Tabela 49. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby uwzględniające wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Poznań	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,750	OK	3				**2 193,8**	**767,8**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**26 619,6**	**9 316,9**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**105 642,7**	**36 975,0**

Tabela 50. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

Poznań	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	1609	1149	821	586	418	299	213	152
Urban	19530	13950	9964	7117	5083	3631	2593	1852
Dense Urban	77507	55362	39544	28246	20175	14411	10293	7352
Bilans pojemności								
Suburban	919%	598%	391%	255%	182%	131%	93%	67%
Urban	1033%	670%	435%	282%	202%	145%	104%	75%
Dense Urban	490%	317%	206%	133%	95%	68%	49%	35%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej rozbudowy sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 2-3 lata, jednak nie zapewni utrzymania założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w zależności od typu środowiska propagacyjnego, w okresie najbliższych 3-6 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G w Poznaniu.

4.2.8. Bydgoszcz

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Bydgoszczy. Poniższe tabele przedstawiają przyjęte założenia dot. liczby urządzeń, konfiguracje stacji bazowych oraz wyniki analizy pojemnościowej.

Tabela 51. Liczba urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km² w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Bydgoszcz	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Suburban	661	728	802	884	881	876	870	864
Urban	8038	8857	9758	10749	10716	10652	10585	10516

Wartości R_{BS} dla miasta Bydgoszcz przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów.

Tabela 52. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla stanu aktualnego

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Bydgoszcz	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	1,000	OK	3				**523,6**	**183,3**
Urban	0,250	OK	3	0,400	OK	3	**7 414,7**	**2 595,1**

Tabela 53. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Bydgoszczy dla obecnej konfiguracji stacji bazowych

Bydgoszcz	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	194	212	232	254	253	252	250	249
Urban	2106	2315	2546	2799	2790	2774	2757	2739
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	384	274	196	140	100	71	51	36
Urban	5439	3885	2775	1982	1416	1011	722	516
Bilans pojemności								
Suburban	198%	129%	84%	55%	40%	28%	20%	14%
Urban	258%	168%	109%	71%	51%	36%	26%	19%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku Bydgoszczy obecnie wykorzystywane zasoby w środowisku podmiejskim pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu do roku 2019, co oznacza konieczność zwiększenia zasobów w tych obszarach w przeciągu roku. Natomiast w przypadku środowiska miejskiego obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego ruchu tylko do 2020 roku i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w okresie 2 lat.

W ramach niniejszego scenariusza przeanalizowano przypadek rozbudowy sieci polegający na wprowadzeniu wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano poniżej.

Tabela 54. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby uwzględniające wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Bydgoszcz	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	1,000	Dopuszczalne	3				**1 234,0**	**431,9**
Urban	0,250	OK	3	0,400	OK	3	**17 175,9**	**6 011,6**

Tabela 55. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

Bydgoszcz	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	905	646	461	329	235	168	120	85
Urban	12601	9001	6429	4592	3280	2343	1673	1195
Bilans pojemności								
Suburban	466%	305%	199%	130%	93%	67%	48%	34%
Urban	598%	389%	253%	164%	118%	84%	61%	44%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej rozbudowy sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 2 lata, jednak nie zapewni utrzymania założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w zależności od typu środowiska propagacyjnego, w okresie najbliższych 3-4 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G w Bydgoszczy.

4.2.9. Katowice

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Katowic. Poniższe tabele przedstawiają przyjęte założenia dot. liczby urządzeń, konfiguracje stacji bazowych oraz wyniki analizy pojemnościowej.

Tabela 56. Liczba urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km² w poszczególnych środowiskach propagacyjnych

Katowice	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Suburban	515	566	622	683	679	673	667	661
Urban	6263	6882	7562	8307	8259	8187	8114	8040
Dense Urban	54112	59463	65333	71772	71357	70734	70102	69461

Wartości R_{BS} dla miasta Katowic przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów.

Tabela 57. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla stanu aktualnego

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Katowice	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,500	OK	3				**2 094,5**	**733,1**
Urban	0,250	OK	3	0,400	OK	3	**7 414,7**	**2 595,1**
Dense Urban	0,125	OK	3	0,200	OK	3	**29 658,7**	**10 380,6**

Tabela 58. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Katowic dla obecnej konfiguracji stacji bazowych

Katowice	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	154	168	183	200	199	197	196	194
Urban	1651	1810	1984	2175	2163	2144	2125	2106
Dense Urban	13776	15125	16605	18228	18124	17967	17807	17646
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	1536	1097	784	560	400	285	204	145
Urban	5439	3885	2775	1982	1416	1011	722	516
Dense Urban	21759	15542	11101	7929	5664	4045	2889	2064
Bilans pojemności								
Suburban	997%	653%	428%	280%	201%	145%	104%	75%
Urban	329%	215%	140%	91%	65%	47%	34%	25%
Dense Urban	158%	103%	67%	43%	31%	23%	16%	12%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku Katowic obecnie wykorzystywane zasoby w środowisku podmiejskim pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu do roku 2024 i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w okresie 6 lat. Natomiast w przypadku środowiska miejskiego obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego ruchu tylko do 2020 roku i niezbędne do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów zasoby będą musiały zostać uruchomione w okresie 2 lat. Z kolei w przypadku środowiska

wielkomiejskiego obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci do 2019 roku, co oznacza, że konieczność zwiększenia zasobów w tych obszarach w przeciągu roku.

W ramach niniejszego scenariusza przeanalizowano przypadek rozbudowy sieci polegający na wprowadzeniu wyższego schematu modulacji w sieci LTE (tj. 256 QAM) oraz wykorzystania konfiguracji MIMO 4x4. Wyniki przeprowadzonej analizy zaprezentowano poniżej.

Tabela 59. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby uwzględniające wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Katowice	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,500	OK	3				**4 936,1**	**1 727,6**
Urban	0,250	OK	3	0,40	OK	3	**17 175,9**	**6 011,6**
Dense Urban	0,125	OK	3	0,200	OK	3	**68 703,6**	**24 046,3**

Tabela 60. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

Katowice	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**	**2025**
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	3621	2586	1847	1319	942	673	480	343
Urban	12601	9001	6429	4592	3280	2343	1673	1195
Dense Urban	50406	36004	25717	18369	13121	9372	6694	4781
Bilans pojemności								
Suburban	2351%	1539%	1009%	660%	473%	342%	245%	177%
Urban	763%	497%	324%	211%	152%	109%	79%	57%
Dense Urban	366%	238%	155%	101%	72%	52%	38%	27%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej rozbudowy sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 1-3 lat i w przypadku środowiska podmiejskiego zapewni utrzymanie założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w środowiskach miejskim i wielkomiejskim w okresie najbliższych 3-5 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G w Katowicach.

4.3. Analiza uwzględniająca dołożenie warstwy nośnej 700 MHz

Analizowany scenariusz zakłada utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, oraz dołożenie warstwy nośnej sieci 5G w paśmie 700 MHz. Jako punkt wyjścia przyjęto tzw. „dobrą" (obecną) konfigurację stacji bazowych dla warstw mikro i makro, która została przedstawiona w punkcie 4.2. W kolejnych krokach wyznaczano liczbę zasobów w sieci 5G w paśmie 700 MHz niezbędną do obsługi założonego poziomu ruch w roku 2025, w poszczególnych środowiskach propagacyjnych, przy czym nie zakłada się budowy stacji bazowych w nowych lokalizacjach i tym samym rozstawienie (gęstość) stacji bazowych nie ulegną zmianie. Ponadto przyjęto, że systemy 3G i LTE wykorzystują technologię MIMO 2x2, system LTE wykorzystuje schemat modulacji 64 QAM, a sieć 5G będzie wykorzystywać schemat modulacji 256 QAM oraz konfigurację MIMO 4x4.

Autorzy niniejszego raportu są świadomi faktu, że zakresy częstotliwości z pasma 700 MHz zostaną uwolnione po 2020 roku. Przedstawiona w tym punkcie analiza ma jednak na celu pokazanie potencjalnych możliwości wykorzystania tych zasobów. Przewiduje się, że będą one ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji [41, 42, 43, 44].

4.3.1. Polska – przypadek ogólny

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla terenu całej Polski, który odpowiada małym i średnim miastom. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 61. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO		
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz	5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz	5 MHz
LTE 700						
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz	10 MHz
LTE 900						
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz	20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz	
LTE 3600						
5G 700	45 MHz		30 MHz		30 MHz	70 MHz

Biorąc po uwagę fakt, że zasoby w paśmie 700 MHz będą ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji [41, 42, 43, 44], można stwierdzić, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji analizowanego scenariusza budowy sieci w środowiskach wielkomiejskim i podmiejskim w oparciu o samo tylko pasmo 700 MHz.

4.3.2. Warszawa

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Warszawy. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 62. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	75 MHz		35 MHz		15 MHz

Biorąc po uwagę fakt, że zasoby w paśmie 700 MHz będą ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji, można stwierdzić, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji analizowanego scenariusza budowy sieci w środowiskach wielkomiejskim i miejskim w Warszawie.

4.3.3. Kraków

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Krakowa. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 63. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	50 MHz		35 MHz		25 MHz

Biorąc po uwagę fakt, że zasoby w paśmie 700 MHz będą ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji, można stwierdzić, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji analizowanego scenariusza budowy sieci w środowiskach wielkomiejskim i miejskim w Krakowie.

4.3.4. Łódź

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Łodzi. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 64. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	45 MHz		20 MHz		50 MHz

Biorąc po uwagę fakt, że zasoby w paśmie 700 MHz będą ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji, można stwierdzić, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji analizowanego scenariusza budowy sieci w środowiskach wielkomiejskim i podmiejskim w Łodzi.

4.3.5. Wrocław

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Wrocławia. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 65. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	45 MHz		20 MHz		50 MHz

Biorąc po uwagę fakt, że zasoby w paśmie 700 MHz będą ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji, można stwierdzić, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji analizowanego scenariusza budowy sieci w środowiskach wielkomiejskim i podmiejskim we Wrocławiu.

4.3.6. Gdańsk

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Gdańska. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 66. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	60 MHz		25 MHz		5 MHz

Biorąc po uwagę fakt, że zasoby w paśmie 700 MHz będą ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji, można stwierdzić, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji analizowanego scenariusza budowy sieci w środowisku wielkomiejskim w Gdańsku.

4.3.7. Poznań

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Poznania. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 67. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	40 MHz		15 MHz		20 MHz

Biorąc po uwagę fakt, że zasoby w paśmie 700 MHz będą ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji, można stwierdzić, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji analizowanego scenariusza budowy sieci w środowisku wielkomiejskim w Poznaniu.

4.3.8. Bydgoszcz

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Bydgoszczy. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 68. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz
LTE 700			
LTE 800		10 MHz	10 MHz
LTE 900			
LTE 1800	20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz
LTE 3600			
5G 700	30 MHz		50 MHz

Biorąc po uwagę fakt, że zasoby w paśmie 700 MHz będą ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji, można stwierdzić, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji analizowanego scenariusza budowy sieci w środowisku podmiejskim w Bydgoszczy.

4.3.9. Katowice

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Katowic. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadająca na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 69. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	55 MHz		25 MHz		5 MHz

Biorąc po uwagę fakt, że zasoby w paśmie 700 MHz będą ograniczone i prawdopodobnie dostępne będą kanały o łącznej szerokości 30 MHz dla każdego z kierunków transmisji, można stwierdzić, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji analizowanego scenariusza budowy sieci w środowisku wielkomiejskim w Katowicach.

4.4. Analiza uwzględniająca dołożenie warstw nośnych 700 MHz, 2.6 GHz, 3.4-3.8 GHz

Analizowany scenariusz zakłada utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, oraz dołożenie warstw nośnych sieci 5G w pasmach 700 MHz, 2.6 GHz oraz 3.4-3.8 GHz, przy czym nie zakłada się budowy stacji bazowych w nowych lokalizacjach. Jako punkt wyjścia przyjęto tzw. „dobrą" (obecną) konfigurację stacji bazowych dla warstw mikro i makro, która została przedstawiona w punkcie 4.2. W kolejnych krokach wyznaczano liczbę zasobów w sieci 5G w poszczególnych pasmach niezbędne do obsługi założonego poziomu ruch w roku 2025, w poszczególnych środowiskach propagacyjnych, przy założeniu, że rozstawienie (gęstość) stacji bazowych nie ulegnie zmianie. Zgodnie z sugestią operatorów sieci komórkowych przyjęto założenie, że w przeprowadzanej analizie w pierwszej kolejności należy wykorzystać zasoby z pasma 700 MHz (szerokość kanału 10 MHz), następnie zasoby z pasma 3.4-3.8 GHz i w razie konieczności zasoby z pasma 2.6 GHz. Ponadto przyjęto, że systemy 3G i LTE wykorzystują technologię MIMO 2x2, system LTE wykorzystuje schemat modulacji 64 QAM, a sieć 5G będzie wykorzystywać schemat modulacji 256 QAM oraz konfigurację MIMO 4x4.

4.4.1. Polska – przypadek ogólny

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla terenu całej Polski, który odpowiada małym i średnim miastom. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 70. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO		
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz	5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz	5 MHz
LTE 700						
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz	10 MHz
LTE 900						
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz	20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz	
LTE 3600						
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz	10 MHz
5G 2600						
5G 3600	35 MHz		20 MHz		20 MHz	60 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 71. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
	Mikro	Makro	Mikro	Makro		
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,303	1,708	0,324	1,873	0,920	4,157
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510	17,413
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	2237,6	61,5	1622,4	61,5	1683,9	3201,5
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	1060,0	21,5	752,4	21,5	773,9	1551,2
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	266,6	7,2	189,7	7,2	196,9	387,6

Tabela 72. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Polska	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Rural	3,500	OK	3				**258,7**	**125,3**
Suburban	2,000	Dopuszczalne	3				**416,7**	**191,5**
Urban	0,700	Dopuszczalne	3	1,200	OK	3	**3 840,1**	**1 779,0**
Dense Urban	0,300	OK	3	0,500	OK	3	**28 811,3**	**13 636,0**

Tabela 73. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku ogólnego Polski dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Polska	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Rural	19	21	22	24	24	24	24	24
Suburban	27	29	32	34	34	34	34	34
Urban	235	258	284	312	312	312	311	310
Dense Urban	1850	2041	2251	2484	2486	2481	2475	2470
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Rural	262	187	134	95	68	48	34	24
Suburban	401	286	204	146	104	74	53	38
Urban	3729	2663	1902	1358	970	693	495	353
Dense Urban	28584	20417	14583	10416	7440	5314	3796	2711
Bilans pojemności								
Rural	1379%	890%	609%	396%	283%	200%	142%	100%
Suburban	1485%	986%	638%	429%	306%	218%	156%	112%
Urban	1587%	1032%	670%	435%	311%	222%	159%	114%
Dense Urban	1545%	1000%	648%	419%	299%	214%	153%	110%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowiskach miejskim i podmiejskim nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 – 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 15 MHz w środowisku wielkomiejskim i 40 MHz w środowisku wiejskim. Alternatywą dla środowiska wiejskiego jest również uruchomienie w nim zasobów 5G w paśmie 2.6 GHz, które w tym środowisku nie są obecnie wykorzystywane. W takim przypadku wymagane byłoby wykorzystanie 20 MHz zasobów w paśmie 2.6 GHz i 20 MHz zasobów w paśmie 3.4 - 3.8 GHz.

4.4.2. Warszawa

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Warszawy. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 74. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	65 MHz		25 MHz		5 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 75. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,249	1,708	0,324	1,873	1,379
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	3468,1	61,5	2647,8	61,5	1068,7
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	1675,3	21,5	1265,1	21,5	466,3
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	420,4	7,2	317,9	7,2	120,0

Tabela 76. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Warszawa	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,500	OK	3				**4 936,1**	**2 153,9**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**52 944,5**	**24 746,7**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**400 907,5**	**193 598,5**

Tabela 77. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Warszawy dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Warszawa	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	282	312	345	382	384	386	387	388
Urban	3130	3478	3863	4290	4319	4334	4348	4361
Dense Urban	26371	29337	32629	36278	36522	36653	36772	36878
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	4515	3225	2303	1645	1175	839	599	428
Urban	51874	37053	26466	18904	13503	9645	6889	4921
Dense Urban	405824	289874	207053	147895	105639	75456	53897	38498
Bilans pojemności								
Suburban	1601%	1034%	668%	431%	306%	217%	155%	110%
Urban	1657%	1065%	685%	441%	313%	223%	158%	113%
Dense Urban	1539%	988%	635%	408%	289%	206%	147%	104%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowisku podmiejskim w Warszawie nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 45 MHz w środowisku wielkomiejskim i 5 MHz w środowisku miejskim.

4.4.3. Kraków

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Krakowa. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 78. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	40 MHz		25 MHz		15 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 79. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,249	1,708	0,324	1,873	1,126
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	2442,7	61,5	1827,5	61,5	1478,9
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	1162,6	21,5	855,0	21,5	671,4
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	292,2	7,2	215,3	7,2	171,2

Tabela 80. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Kraków	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,750	OK	3				**3 035,8**	**1 378,3**
Urban	0,250	OK	3	0,400	OK	3	**33 936,7**	**15 856,2**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**282 505,6**	**134 397,5**

Tabela 81. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Krakowa dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Kraków	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	199	220	242	267	268	268	268	269
Urban	2167	2401	2660	2947	2960	2964	2967	2969
Dense Urban	18159	20153	22362	24805	24917	24952	24977	24994
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	2889	2063	1474	1052	752	537	383	274
Urban	33237	23741	16958	12112	8652	6180	4414	3153
Dense Urban	281726	201233	143737	102669	73335	52382	37416	26725
Bilans pojemności								
Suburban	1452%	938%	609%	394%	281%	200%	143%	102%
Urban	1534%	989%	638%	411%	292%	209%	149%	106%
Dense Urban	1551%	999%	643%	414%	294%	210%	150%	107%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowisku u podmiejskim w Krakowie nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 20 MHz w środowisku wielkomiejskim i 5 MHz w środowisku miejskim.

4.4.4. Łódź

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Łodzi. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 82. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	35 MHz		10 MHz		40 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 83. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,249	1,708	0,394	1,873	0,920
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	2237,6	61,5	1212,3	61,5	2504,2
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	1060,0	21,5	547,3	21,5	1184,1
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	266,6	7,2	138,4	7,2	299,4

Tabela 84. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Łódź	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	1,000	Dopuszczalne	3				**2 891,7**	**1 367,3**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**35 184,2**	**15 866,5**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**258 825,2**	**122 557,3**

Tabela 85. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Łodzi dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Łódź	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	198	216	236	258	257	255	253	251
Urban	2156	2365	2594	2846	2831	2808	2785	2762
Dense Urban	18064	19845	21800	23943	23819	23626	23430	23233
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	2866	2047	1462	1044	746	532	380	271
Urban	33259	23756	16969	12120	8657	6184	4417	3155
Dense Urban	256906	183504	131074	93624	66874	47767	34119	24371
Bilans pojemności								
Suburban	1447%	948%	619%	405%	290%	209%	150%	108%
Urban	1543%	1004%	654%	426%	306%	220%	159%	114%
Dense Urban	1422%	925%	601%	391%	281%	202%	146%	105%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowisku miejskim w Łodzi nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 15 MHz w środowisku wielkomiejskim i 20 MHz w środowisku podmiejskim.

4.4.5. Wrocław

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Wrocławia. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 86. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	35 MHz		10 MHz		40 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 87. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,249	1,708	0,394	1,873	0,920
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	2237,6	61,5	1212,3	61,5	2504,2
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	1060,0	21,5	547,3	21,5	1184,1
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	266,6	7,2	138,4	7,2	299,4

Tabela 88. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Wrocław	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	1,000	Dopuszczalne	3				**2 891,7**	**1 367,3**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**35 184,2**	**15 866,5**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**258 825,2**	**122 557,3**

Tabela 89. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Wrocławia dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Wrocław	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	187	206	227	250	251	251	251	251
Urban	2023	2241	2482	2749	2761	2764	2767	2769
Dense Urban	16937	18790	20844	23116	23218	23249	23274	23292
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	2866	2047	1462	1044	746	532	380	271
Urban	33259	23756	16969	12120	8657	6184	4417	3155
Dense Urban	256906	183504	131074	93624	66874	47767	34119	24371
Bilans pojemności								
Suburban	1533%	994%	644%	418%	297%	212%	151%	108%
Urban	1644%	1060%	684%	441%	314%	224%	160%	114%
Dense Urban	1517%	977%	629%	405%	288%	205%	147%	105%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowisku miejskim we Wrocławiu nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 15 MHz w środowisku wielkomiejskim i 20 MHz w środowisku podmiejskim.

4.4.6. Gdańsk

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Gdańska. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 90. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	50 MHz		15 MHz		

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 91. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,249	1,708	0,394	1,873	1,379
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	2852,9	61,5	1417,3	61,5	863,6
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	1367,6	21,5	649,9	21,5	363,8
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	343,5	7,2	164,1	7,2	94,3

Tabela 92. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Gdańsk	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,500	OK	3				**3 988,9**	**1 680,3**
Urban	0,250	OK	3	0,400	OK	3	**26 359,0**	**12 067,3**
Dense Urban	0,125	OK	3	0,200	OK	3	**211 524,1**	**101 313,2**

Tabela 93. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Gdańska dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Gdańsk	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	154	170	187	206	207	207	207	207
Urban	1650	1828	2024	2241	2251	2254	2256	2258
Dense Urban	13766	15275	16946	18794	18877	18902	18921	18934
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	3522	2515	1797	1283	916	654	467	334
Urban	25295	18068	12905	9218	6584	4703	3359	2399
Dense Urban	212374	151696	108354	77395	55282	39487	28205	20146
Bilans pojemności								
Suburban	2287%	1479%	961%	623%	443%	316%	226%	161%
Urban	1533%	988%	638%	411%	292%	209%	149%	106%
Dense Urban	1543%	993%	639%	412%	293%	209%	149%	106%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowiskach miejskim i podmiejskim w Gdańsku nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 30 MHz w środowisku wielkomiejskim.

4.4.7. Poznań

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Poznania. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 94. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	30 MHz		5 MHz		10 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 95. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,249	1,708	0,481	1,873	1,126
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	2852,9	61,5	1007,2	61,5	1273,8
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	1367,6	21,5	444,8	21,5	568,9
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	343,5	7,2	112,8	7,2	145,6

Tabela 96. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Poznań	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,750	OK	3				**2 614,8**	**1 167,8**
Urban	0,200	OK	3	0,350	OK	3	**29 264,1**	**12 906,5**
Dense Urban	0,100	OK	3	0,200	OK	3	**235 144,8**	**110 717,1**

Tabela 97. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Poznania dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Poznań	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	175	192	210	230	230	229	228	226
Urban	1891	2082	2292	2523	2519	2507	2494	2481
Dense Urban	15815	17441	19229	21195	21158	21056	20947	20832
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	2447	1748	1248	892	637	455	325	232
Urban	27054	19324	13803	9859	7042	5030	3593	2566
Dense Urban	232087	165776	118411	84579	60414	43152	30823	22016
Bilans pojemności								
Suburban	1398%	910%	594%	388%	277%	199%	143%	103%
Urban	1431%	928%	602%	391%	280%	201%	144%	103%
Dense Urban	1468%	950%	616%	399%	286%	205%	147%	106%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowiskach miejskim i podmiejskim w Poznaniu nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 10 MHz w środowisku wielkomiejskim.

4.4.8. Bydgoszcz

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Bydgoszczy. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 98. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz
LTE 700			
LTE 800		10 MHz	10 MHz
LTE 900			
LTE 1800	20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz
LTE 3600			
5G 700	10 MHz		10 MHz
5G 2600			
5G 3600	20 MHz		40 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 99. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Urban		Suburban
	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,324	1,873	0,920
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1622,4	61,5	2504,2
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	752,4	21,5	1184,1
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	189,7	7,2	299,4

Tabela 100. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Bydgoszcz	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	1,000	Dopuszczalne	3				**2 891,7**	**1 367,3**
Urban	0,240	OK	3	0,400	OK	3	**30 147,8**	**13 961,7**

Tabela 101. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Bydgoszczy dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Bydgoszcz	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	194	212	232	254	253	252	250	249
Urban	2106	2315	2546	2799	2790	2774	2757	2739
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	2866	2047	1462	1044	746	532	380	271
Urban	29266	20904	14932	10665	7618	5441	3886	2776
Bilans pojemności								
Suburban	1477%	966%	630%	411%	295%	211%	152%	109%
Urban	1390%	903%	586%	381%	273%	196%	141%	101%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowisku miejskim w Bydgoszczy nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 20 MHz w środowisku podmiejskim.

4.4.9. Katowice

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Katowic. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 oraz wartości R_{BS} przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 102. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	45 MHz		15 MHz		

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 103. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,249	1,708	0,394	1,873	1,379
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	2647,8	61,5	1417,3	61,5	863,6
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	1265,1	21,5	649,9	21,5	363,8
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	317,9	7,2	164,1	7,2	94,3

Tabela 104. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Katowice	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,500	OK	3				**3 988,9**	**1 680,3**
Urban	0,250	OK	3	0,400	OK	3	**26 359,0**	**12 067,3**
Dense Urban	0,125	OK	3	0,200	OK	3	**196 368,6**	**93 735,5**

Tabela 105. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Katowic dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Katowice	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	154	168	183	200	199	197	196	194
Urban	1651	1810	1984	2175	2163	2144	2125	2106
Dense Urban	13776	15125	16605	18228	18124	17967	17807	17646
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	3522	2515	1797	1283	916	654	467	334
Urban	25295	18068	12905	9218	6584	4703	3359	2399
Dense Urban	196489	140349	100249	71607	51147	36534	26095	18639
Bilans pojemności								
Suburban	2287%	1497%	982%	642%	460%	332%	238%	172%
Urban	1532%	998%	650%	424%	304%	219%	158%	114%
Dense Urban	1426%	928%	604%	393%	282%	203%	147%	106%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowiskach miejskim i podmiejskim w Katowicach nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 25 MHz w środowisku wielkomiejskim.

4.5. Analiza uwzględniająca budowę sieci mikro- oraz piko-komórek

Analizowany scenariusz zakłada utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, oraz dołożenie warstw nośnych sieci 5G w pasmach 700 MHz, 2.6 GHz oraz 3.4 – 3.8 GHz przy jednoczesnym zwiększeniu liczby stacji bazowych. Jako punkt wyjścia przyjęto tzw. „dobrą" (obecną) konfigurację stacji bazowych dla warstw mikro i makro, która została przedstawiona w punkcie 4.2. W kolejnych krokach wyznaczano liczbę zasobów w sieci 5G w poszczególnych pasmach niezbędne do obsługi założonego poziomu ruch w roku 2025, w poszczególnych środowiskach propagacyjnych. Założono, że liczba stacji bazowych zostanie dwukrotnie zwiększona, w związku z czym zasięg R_{BS} stacji ulegnie proporcjonalnemu zmniejszeniu ($1/\sqrt{2}$ – krotnie) w stosunku do wartości przyjmowanych w punkcie 4.2. Podobnie jak w poprzednio, zgodnie z sugestią operatorów sieci komórkowych przyjęto założenie, że w przeprowadzanej analizie w pierwszej kolejności należy wykorzystać zasoby z pasma 700 MHz (szerokość kanału 10 MHz), następnie zasoby z pasma 3.4 – 3.8 GHz i w razie konieczności zasoby z pasma 2.6 GHz. Ponadto przyjęto, że systemy 3G i LTE wykorzystują technologię MIMO 2x2, system LTE wykorzystuje schemat modulacji 64 QAM, a sieć 5G będzie wykorzystywać schemat modulacji 256 QAM oraz konfigurację MIMO 4x4.

4.5.1. Polska – przypadek ogólny

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla terenu całej Polski, który odpowiada małym i średnim miastom. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2, natomiast wartości R_{BS} przyjęte w punkcie 4.2 zostały proporcjonalnie zmniejszone.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 106. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO		
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz	5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz	5 MHz
LTE 700						
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz	10 MHz
LTE 900						
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz	20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz	
LTE 3600						
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz	10 MHz
5G 2600						
5G 3600	10 MHz					25 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 107. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban	Rural
	Mikro	Makro	Mikro	Makro		
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,303	1,708	0,519	1,873	1,379	4,157
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510	17,413
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1212,3	61,5	802,1	61,5	863,6	1766,0
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	547,3	21,5	342,3	21,5	363,8	833,4
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	138,4	7,2	87,2	7,2	94,3	208,2

Tabela 108. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Polska	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Rural	2,480	OK	3				**119,2**	**51,6**
Suburban	1,410	Dopuszczalne	3				**634,1**	**283,2**
Urban	0,500	OK	3	0,860	OK	3	**4684,4**	**2065,8**
Dense Urban	0,210	OK	3	0,370	OK	3	**37278,2**	**17074,6**

Tabela 109. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku ogólnego Polski dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Polska	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Rural	19	21	22	24	24	24	24	24
Suburban	27	29	32	34	34	34	34	34
Urban	235	258	284	312	312	312	311	310
Dense Urban	1850	2041	2251	2484	2486	2481	2475	2470
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Rural	281	200	143	102	73	52	37	26
Suburban	379	271	193	138	98	70	50	36
Urban	3337	2383	1702	1216	868	620	443	316
Dense Urban	30164	21545	15389	10992	7851	5608	4006	2861
Bilans pojemności								
Rural	1479%	952%	650%	425%	304%	217%	154%	108%
Suburban	1404%	934%	603%	406%	288%	206%	147%	106%
Urban	1420%	924%	599%	390%	278%	199%	142%	102%
Dense Urban	1630%	1056%	684%	443%	316%	226%	162%	116%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowiskach wielkomiejskim, miejskim i podmiejskim nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 5 MHz w środowisku wiejskim. Alternatywą dla środowiska wiejskiego jest uruchomienie w nim zasobów 5G w paśmie 2.6 GHz, które w tym środowisku nie są obecnie wykorzystywane. W takim przypadku wymagane byłoby wykorzystanie 5 MHz zasobów w tym paśmie.

4.5.2. Warszawa

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Warszawy. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2, natomiast wartości R_{BS} przyjęte w punkcie 4.2 zostały proporcjonalnie zmniejszone.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 110. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	25 MHz		5 MHz		

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 111. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,249	1,708	0,481	1,873	1,379
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1827,5	61,5	1007,2	61,5	863,6
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	855,0	21,5	444,8	21,5	363,8
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	215,3	7,2	112,8	7,2	94,3

Tabela 112. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Warszawa	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,350	OK	3				**8 140,6**	**3 429,1**
Urban	0,140	OK	3	0,240	OK	3	**59 755,9**	**26 351,4**
Dense Urban	0,070	OK	3	0,120	OK	3	**432 332,7**	**202 060,1**

Tabela 113. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Warszawy dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Warszawa	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	282	312	345	382	384	386	387	388
Urban	3130	3478	3863	4290	4319	4334	4348	4361
Dense Urban	26371	29337	32629	36278	36522	36653	36772	36878
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	7188	5134	3667	2619	1871	1336	954	681
Urban	55238	39455	28182	20130	14378	10270	7336	5240
Dense Urban	423561	302544	216102	154359	110256	78754	56253	40180
Bilans pojemności								
Suburban	2549%	1646%	1063%	686%	487%	346%	247%	176%
Urban	1765%	1134%	730%	469%	333%	237%	169%	120%
Dense Urban	1606%	1031%	662%	425%	302%	215%	153%	109%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowiskach miejskim i podmiejskim w Warszawie nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz, a ponadto wymagane zasoby w tym paśmie można by ograniczyć do 5 MHz w środowisku wielkomiejskim.

4.5.3. Kraków

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Krakowa. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2, natomiast wartości R_{BS} przyjęte w punkcie 4.2 zostały proporcjonalnie zmniejszone.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 114. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	10 MHz		5 MHz		

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 115. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,303	1,708	0,481	1,873	1,379
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1212,3	61,5	1007,2	61,5	863,6
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	547,3	21,5	444,8	21,5	363,8
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	138,4	7,2	112,8	7,2	94,3

Tabela 116. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Kraków	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,530	OK	3				**3 550,1**	**1 495,4**
Urban	0,180	OK	3	0,310	OK	3	**36 144,0**	**15 939,3**
Dense Urban	0,070	OK	3	0,120	OK	3	**287 350,7**	**129 569,1**

Tabela 117. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Krakowa dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Kraków	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	199	220	242	267	268	268	268	269
Urban	2167	2401	2660	2947	2960	2964	2967	2969
Dense Urban	18159	20153	22362	24805	24917	24952	24977	24994
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	3134	2239	1599	1142	816	582	416	297
Urban	33412	23865	17047	12176	8697	6212	4437	3169
Dense Urban	271605	194003	138574	98981	70701	50500	36071	25765
Bilans pojemności								
Suburban	1575%	1018%	661%	428%	304%	217%	155%	110%
Urban	1542%	994%	641%	413%	294%	210%	150%	107%
Dense Urban	1496%	963%	620%	399%	284%	202%	144%	103%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas we wszystkich środowiskach propagacyjnych w Krakowie nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz.

4.5.4. Łódź

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Łodzi. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2, natomiast wartości R_{BS} przyjęte w punkcie 4.2 zostały proporcjonalnie zmniejszone.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 118. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	10 MHz				10 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 119. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,303	1,708	0,519	1,873	1,126
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1212,3	61,5	802,1	61,5	1273,8
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	547,3	21,5	342,3	21,5	568,9
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	138,4	7,2	87,2	7,2	145,6

Tabela 120. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Łódź	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,710	OK	3				**2 917,7**	**1 303,1**
Urban	0,140	OK	3	0,240	OK	3	**47 674,0**	**20 310,5**
Dense Urban	0,070	OK	3	0,120	OK	3	**287 350,7**	**129 569,1**

Tabela 121. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Łodzi dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Łódź	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	198	216	236	258	257	255	253	251
Urban	2156	2365	2594	2846	2831	2808	2785	2762
Dense Urban	18064	19845	21800	23943	23819	23626	23430	23233
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	2731	1951	1393	995	711	507	362	259
Urban	42575	30410	21722	15515	11082	7916	5654	4038
Dense Urban	271605	194003	138574	98981	70701	50500	36071	25765
Bilans pojemności								
Suburban	1379%	903%	590%	386%	277%	199%	143%	103%
Urban	1975%	1286%	837%	545%	391%	282%	203%	146%
Dense Urban	1504%	978%	636%	413%	297%	214%	154%	111%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas we wszystkich środowiskach propagacyjnych w Krakowie nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz.

4.5.5. Wrocław

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Wrocławia. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2, natomiast wartości R_{BS} przyjęte w punkcie 4.2 zostały proporcjonalnie zmniejszone.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 122. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	10 MHz				10 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 123. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,303	1,708	0,519	1,873	1,126
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1212,3	61,5	802,1	61,5	1273,8
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	547,3	21,5	342,3	21,5	568,9
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	138,4	7,2	87,2	7,2	145,6

Tabela 124. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Wrocław	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,710	OK	3				**2 917,7**	**1 303,1**
Urban	0,140	OK	3	0,240	OK	3	**47 674,0**	**20 310,5**
Dense Urban	0,070	OK	3	0,120	OK	3	**287 350,7**	**129 569,1**

Tabela 125. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Wrocławia dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Wrocław	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	187	206	227	250	251	251	251	251
Urban	2023	2241	2482	2749	2761	2764	2767	2769
Dense Urban	16937	18790	20844	23116	23218	23249	23274	23292
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	2731	1951	1393	995	711	507	362	259
Urban	42575	30410	21722	15515	11082	7916	5654	4038
Dense Urban	271605	194003	138574	98981	70701	50500	36071	25765
Bilans pojemności								
Suburban	1460%	947%	614%	398%	283%	202%	144%	103%
Urban	2105%	1357%	875%	564%	401%	286%	204%	146%
Dense Urban	1604%	1032%	665%	428%	305%	217%	155%	111%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas we wszystkich środowiskach propagacyjnych we Wrocławiu nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz.

4.5.6. Gdańsk

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Gdańska. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2, natomiast wartości R_{BS} przyjęte w punkcie 4.2 zostały proporcjonalnie zmniejszone.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 126. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		
5G 2600					
5G 3600	20 MHz				

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 127. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,249	1,708	0,519	1,873	1,379
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1622,4	61,5	802,1	61,5	453,5
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	752,4	21,5	342,3	21,5	158,7
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	189,7	7,2	87,2	7,2	43,1

Tabela 128. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Gdańsk	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,350	OK	3				**4 274,4**	**1 496,1**
Urban	0,180	OK	3	0,310	OK	3	**28 835,2**	**12 284,9**
Dense Urban	0,090	OK	3	0,150	OK	3	**232 420,7**	**107 658,8**

Tabela 129. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Gdańska dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Gdańsk	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	154	170	187	206	207	207	207	207
Urban	1650	1828	2024	2241	2251	2254	2256	2258
Dense Urban	13766	15275	16946	18794	18877	18902	18921	18934
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	3136	2240	1600	1142	816	583	416	297
Urban	25751	18394	13138	9384	6703	4788	3420	2442
Dense Urban	225676	161197	115140	82243	58745	41960	29972	21408
Bilans pojemności								
Suburban	2036%	1318%	856%	554%	394%	282%	201%	143%
Urban	1561%	1006%	649%	419%	298%	212%	152%	108%
Dense Urban	1639%	1055%	679%	438%	311%	222%	158%	113%

Dwukrotne zwiększenie liczby stacji bazowych spowoduje, że w środowisku podmiejskim w Gdańsku nie będzie konieczności wykorzystywania nowych zasobów sieci 5G.

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowiskach wielkomiejskim w Gdańsku nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz.

4.5.7. Poznań

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Poznania. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2, natomiast wartości R_{BS} przyjęte w punkcie 4.2 zostały proporcjonalnie zmniejszone.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 130. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		10 MHz
5G 2600					
5G 3600	5 MHz				

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 131. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,368	1,708	0,519	1,873	1,379
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1007,2	61,5	802,1	61,5	863,6
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	444,8	21,5	342,3	21,5	363,8
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	112,8	7,2	87,2	7,2	94,3

Tabela 132. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Poznań	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,530	OK	3				**3 550,1**	**1 495,4**
Urban	0,140	OK	3	0,240	OK	3	**47 674,0**	**20 310,5**
Dense Urban	0,070	OK	3	0,120	OK	3	**239 023,4**	**105 405,5**

Tabela 133. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Poznania dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Poznań	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	175	192	210	230	230	229	228	226
Urban	1891	2082	2292	2523	2519	2507	2494	2481
Dense Urban	15815	17441	19229	21195	21158	21056	20947	20832
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	3134	2239	1599	1142	816	582	416	297
Urban	42575	30410	21722	15515	11082	7916	5654	4038
Dense Urban	220952	157823	112731	80522	57515	41082	29344	20960
Bilans pojemności								
Suburban	1791%	1166%	761%	497%	355%	254%	182%	131%
Urban	2251%	1461%	948%	615%	440%	316%	227%	163%
Dense Urban	1397%	905%	586%	380%	272%	195%	140%	101%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowisku wielkomiejskim w Poznaniu nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz.

4.5.8. Bydgoszcz

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Bydgoszczy. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2, natomiast wartości R_{BS} przyjęte w punkcie 4.2 zostały proporcjonalnie zmniejszone.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 134. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz
LTE 700			
LTE 800		10 MHz	10 MHz
LTE 900			
LTE 1800	20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz
LTE 3600			
5G 700	10 MHz		10 MHz
5G 2600			
5G 3600	5 MHz		10 MHz

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 135. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Urban		Suburban
	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,481	1,873	1,126
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1007,2	61,5	1273,8
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	444,8	21,5	568,9
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	112,8	7,2	145,6

Tabela 136. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Bydgoszcz	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,710	OK	3				**2 917,7**	**1 303,1**
Urban	0,180	OK	3	0,310	OK	3	**36 144,0**	**15 939,3**

Tabela 137. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Bydgoszczy dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Bydgoszcz	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	194	212	232	254	253	252	250	249
Urban	2106	2315	2546	2799	2790	2774	2757	2739
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	2731	1951	1393	995	711	507	362	259
Urban	33412	23865	17047	12176	8697	6212	4437	3169
Bilans pojemności								
Suburban	1408%	920%	600%	392%	281%	201%	145%	104%
Urban	1587%	1031%	670%	435%	312%	224%	161%	116%

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowiskach miejskim i podmiejskim w Bydgoszczy nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz.

4.5.9. Katowice

Poniżej przedstawiono wyniki analizy pojemnościowej dla obszaru Katowic. Wartości liczby urządzeń mobilnych przypadających na 1 km^2 przyjęto takie same jak w analizie przedstawionej w punkcie 4.2, natomiast wartości R_{BS} przyjęte w punkcie 4.2 zostały proporcjonalnie zmniejszone.

Poniższa tabela przedstawia wymaganą konfigurację stacji bazowej, zawierającą minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku.

Tabela 138. Wymagana konfiguracja stacji bazowej

	Dense Urban		Urban		Suburban
	MIKRO	MAKRO	MIKRO	MAKRO	
3G 900	5 MHz		5 MHz		5 MHz
3G 2100	5 MHz		5 MHz		5 MHz
LTE 700					
LTE 800		10 MHz		10 MHz	10 MHz
LTE 900					
LTE 1800	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 2100	10 MHz		10 MHz		10 MHz
LTE 2600	20 MHz		20 MHz		20 MHz
LTE 3600					
5G 700	10 MHz		10 MHz		
5G 2600					
5G 3600	15 MHz				

Dla powyższej konfiguracji wyznaczono zasięgi stacji bazowych oraz jej zasoby, które przedstawiono poniżej.

Tabela 139. Zasięgi stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Dense Urban		Urban		Suburban
	Mikro	Makro	Mikro	Makro	
Minimalna wymagana wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,303	1,708	0,519	1,873	1,379
Maksymalna wartość zasięgu Best Server R_{BS} [km]	0,975	4,195	1,293	4,668	3,510
Zasoby teoretyczne w sektorze [Mbps]	1417,3	61,5	802,1	61,5	453,5
Zasoby rzeczywiste w sektorze [Mbps]	649,9	21,5	342,3	21,5	158,7
Minimalna łączna dostępna przepływność sieci 4G/5G na granicy sektora [Mbps]	164,1	7,2	87,2	7,2	43,1

Tabela 140. Przyjęta konfiguracja zasięgów stacji bazowej i jej zasoby dla przyjętej konfiguracji

	Warstwa mikro			Warstwa makro				
Katowice	R_{BS} [km]	Status	sektory	R_{BS} [km]	Status	sektory	Łączne zasoby teoretyczne [Mbps/km2]	Łączne zasoby rzeczywiste [Mbps/km2]
Suburban	0,350	OK	3				**4 274,4**	**1 496,1**
Urban	0,180	OK	3	0,310	OK	3	**28 835,2**	**12 284,9**
Dense Urban	0,090	OK	3	0,150	OK	3	**203 185,6**	**93 041,2**

Tabela 141. Wynik analizy pojemnościowej dla przypadku Katowic dla przyjętej konfiguracji stacji bazowych

Katowice	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Liczba wymaganych zasobów (kanałów)								
Suburban	154	168	183	200	199	197	196	194
Urban	1651	1810	1984	2175	2163	2144	2125	2106
Dense Urban	13776	15125	16605	18228	18124	17967	17807	17646
Liczba dostępnych zasobów (kanałów)								
Suburban	3136	2240	1600	1142	816	583	416	297
Urban	25751	18394	13138	9384	6703	4788	3420	2442
Dense Urban	195034	139310	99507	71076	50769	36263	25902	18501
Bilans pojemności								
Suburban	2036%	1333%	874%	571%	410%	296%	212%	153%
Urban	1560%	1016%	662%	431%	310%	223%	161%	116%
Dense Urban	1416%	921%	599%	390%	280%	202%	145%	105%

Dwukrotne zwiększenie liczby stacji bazowych spowoduje, że w środowisku podmiejskim w Katowicach nie będzie konieczności wykorzystywania nowych zasobów sieci 5G.

Biorąc po uwagę fakt, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz (z prawdopodobnie dostępnych 30 MHz), to w związku z tym zasoby wymagane w pozostałych pasmach muszą być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w środowisku wielkomiejskim w Katowicach nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz.

5. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym raporcie wyniki przeprowadzonych analiz pojemnościowych dla różnych przypadków bazowały na parametrach wejściowych, które zostały ustalone i zatwierdzone w trakcie cyklicznych spotkań z operatorami sieci komórkowych. We wszystkich rozpatrywanych typach środowisk propagacyjnych zdecydowano się wykorzystać ten sam model popytowy na ruch w sieci oraz taką samą liczbę urządzeń per capita. Na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego oraz przy uwzględnieniu założeń modelu popytowego określono liczbę ludności, która będzie generować ruch w GNR w poszczególnych środowiskach propagacyjnych. Na tej podstawie przeprowadzono analizę pojemnościową dla przypadku ogólnego całej Polski (który odpowiada małym i średnim miastom) oraz dla przypadków szczególnych – dla wybranych dużych miast. Prezentowane wyniki nie uwzględniają jednak ograniczeń wynikających z przyjętych wartości PEM w Polsce, w tym ograniczeń dla możliwości instalacji nowych pasm częstotliwości lub implementacji rozwązań opartych o mikro i piko komórki.

Zgodnie z przyjętymi założeniami analiza pojemnościowa została przeprowadzona dla następujących scenariuszy:

- Utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości,
- Dołożenie warstwy nośnej 700 MHz,
- Dołożenie potencjalnych nowych warstw nośnych 700 MHz, 2.6 GHz, 3.4 – 3.8 GHz,
- Umożliwienie budowy sieci mikro- oraz piko-komórek.

Na podstawie danych uzyskanych od operatorów sieci komórkowych przyjętą tzw. „dobrą” (obecną) konfigurację stacji bazowych dla warstw mikro i makro, która stanowiła punkt wyjściowy wszystkich przeprowadzonych analiz.

Rozstawienie stacji bazowych R_{BS} w poszczególnych środowiskach propagacyjnych przyjęto dla przypadku ogólnego Polski na podstawie danych przekazanych przez operatorów sieci komórkowych i wynikają one z podzielenia obszaru danego typu środowiska przez liczbę stacji bazowych wszystkich operatorów w tym środowisku przy założeniu ok. 20% wspólnych lokalizacji. Z kolei w przypadku poszczególnych miast, wartości R_{BS} przyjęto na podstawie rzeczywistej siatki rozstawienia stacji bazowych wszystkich operatorów.

Zbiorcze wyniki analizy dla scenariusza 1, zakładającego utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, prezentuje poniższa tabela.

Tabela 142. Wynik analizy bilansu pojemności dla obecnej konfiguracji stacji bazowych w poszczególnych obszarach

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Polska								
Rural	100%	62%	41%	29%	21%	13%	8%	4%
Suburban	304%	200%	131%	88%	62%	44%	29%	21%
Urban	293%	191%	124%	80%	57%	41%	29%	21%
Dense Urban	203%	132%	85%	55%	39%	28%	20%	14%
Warszawa								
Suburban	545%	352%	227%	147%	104%	74%	53%	37%
Urban	270%	173%	111%	72%	51%	36%	26%	18%
Dense Urban	127%	82%	52%	34%	24%	17%	12%	9%
Kraków								
Suburban	343%	221%	144%	93%	66%	47%	34%	24%
Urban	251%	162%	104%	67%	48%	34%	24%	17%
Dense Urban	185%	119%	77%	49%	35%	25%	18%	13%
Łódź								
Suburban	194%	127%	83%	54%	39%	28%	20%	14%
Urban	391%	255%	166%	108%	78%	56%	40%	29%
Dense Urban	186%	121%	78%	51%	37%	26%	19%	14%
Wrocław								
Suburban	205%	133%	86%	56%	40%	28%	20%	14%
Urban	417%	269%	173%	112%	80%	57%	40%	29%
Dense Urban	198%	127%	82%	53%	38%	27%	19%	14%
Gdańsk								
Suburban	997%	645%	419%	272%	193%	138%	99%	70%
Urban	330%	213%	137%	88%	63%	45%	32%	23%
Dense Urban	158%	102%	66%	42%	30%	21%	15%	11%
Poznań								
Suburban	390%	254%	166%	108%	77%	55%	39%	28%
Urban	446%	290%	188%	122%	87%	63%	45%	32%
Dense Urban	212%	137%	89%	58%	41%	30%	21%	15%
Bydgoszcz								
Suburban	198%	129%	84%	55%	40%	28%	20%	14%
Urban	258%	168%	109%	71%	51%	36%	26%	19%
Katowice								
Suburban	997%	653%	428%	280%	201%	145%	104%	75%
Urban	329%	215%	140%	91%	65%	47%	34%	25%
Dense Urban	158%	103%	67%	43%	31%	23%	16%	12%

Na podstawie powyższej tabeli można stwierdzić, że w przypadku ogólnym dla Polski, reprezentującym małe i średnie miasta, obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci w poszczególnych środowiskach tylko w perspektywie najbliższych dwóch lat. Sytuacja wygląda najgorzej w środowisku wiejskim, gdzie tylko bieżący rok bilansuje się pojemnościowo, co oznacza konieczność zwiększenia zasobów w tych obszarach jeszcze w 2018 roku w celu utrzymania założonej jakości obsługi abonentów. Z kolei w środowiskach miejskim i podmiejskim, obecne zasoby sieci pozwolą na obsługę założonego poziomu ruch do roku 2020 i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w okresie 2 lata. Z kolei w środowisku wielkomiejskim obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego

ruchu do 2019 roku, co oznacza konieczność zwiększenia zasobów w tych obszarach w przeciągu roku.

Wyniki analizy przeprowadzone dla wybranych dużych miast również pokazują, że obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci w poszczególnych środowiskach tylko w perspektywie najbliższych kilku lat. Sytuacja wygląda najgorzej w przypadku środowiska wielkomiejskiego, gdzie obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci tylko do roku 2019 we wszystkich analizowanych miastach oprócz Warszawy, gdzie zasoby pojemnościowe bilansują się tylko w bieżącym roku. Oznacza to konieczność zwiększenia zasobów w przeciągu roku w celu utrzymania założonej jakości obsługi abonentów. W przypadku środowiska miejskiego we wszystkich analizowanych miastach, obecnie wykorzystywane zasoby pozwolą na obsługę założonego poziomu ruch do roku 2020 lub 2021 i tym samym niezbędne zwiększanie zasobów w sieci będzie mogło odbywać się sukcesywnie lub etapowo w okresie 2-3 lata. Największe rozbieżności pomiędzy miastami występują w przypadku środowiska podmiejskiego, gdzie obecne zasoby pozwolą na obsługę założonego ruchu jeszcze przez okres od roku (Łódź, Wrocław, Bydgoszcz) do 4-6 lat (Warszawa, Gdańsk, Katowice). W związku z tym niezbędne do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów zasoby będą musiały w większości przypadków zostać zwiększone w okresie od 2 do 4 lat.

Ponieważ scenariusz 1 zakłada utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, poddano również analizie przypadek potencjalnej rozbudowy sieci polegający na zwiększeniu jej zasobów poprzez wprowadzenie wyższego schematu modulacji w LTE tj. 256 QAM w miejsce 64 QAM oraz wykorzystanie konfiguracji MIMO 4x4 w miejsce MIMO 2x2. Takie rozwiązanie może okazać się alternatywą dla wprowadzenia nowych urządzeń 5G i przesunąć w czasie konieczność budowy nowych stacji bazowych niezbędnych do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów. Zbiorcze wyniki tej analizy prezentuje poniższa tabela.

Tabela 143. Wynik analizy pojemnościowej uwzględniającej wykorzystanie modulacji 256QAM oraz konfiguracji MIMO 4x4 w LTE

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Polska								
Rural	226%	148%	100%	63%	46%	33%	21%	17%
Suburban	719%	476%	306%	206%	147%	106%	74%	53%
Urban	679%	442%	287%	186%	133%	95%	68%	49%
Dense Urban	471%	305%	198%	128%	91%	65%	47%	33%
Warszawa								
Suburban	1284%	829%	535%	345%	245%	174%	124%	88%
Urban	624%	401%	258%	166%	118%	84%	60%	42%
Dense Urban	294%	189%	121%	78%	55%	39%	28%	20%
Kraków								
Suburban	809%	522%	339%	219%	156%	112%	79%	57%
Urban	581%	375%	242%	156%	111%	79%	56%	40%
Dense Urban	427%	275%	177%	114%	81%	58%	41%	29%
Łódź								
Suburban	457%	299%	195%	128%	91%	66%	47%	34%
Urban	906%	590%	384%	250%	180%	129%	93%	67%
Dense Urban	429%	279%	181%	118%	85%	61%	44%	32%
Wrocław								
Suburban	484%	314%	203%	132%	94%	67%	48%	34%
Urban	965%	622%	401%	259%	184%	131%	94%	67%
Dense Urban	458%	295%	190%	122%	87%	62%	44%	32%
Gdańsk								
Suburban	2351%	1521%	988%	640%	455%	325%	232%	166%
Urban	764%	492%	318%	205%	146%	104%	74%	53%
Dense Urban	366%	236%	152%	98%	70%	50%	35%	25%
Poznań								
Suburban	919%	598%	391%	255%	182%	131%	93%	67%
Urban	1033%	670%	435%	282%	202%	145%	104%	75%
Dense Urban	490%	317%	206%	133%	95%	68%	49%	35%
Bydgoszcz								
Suburban	466%	305%	199%	130%	93%	67%	48%	34%
Urban	598%	389%	253%	164%	118%	84%	61%	44%
Katowice								
Suburban	2351%	1539%	1009%	660%	473%	342%	245%	177%
Urban	763%	497%	324%	211%	152%	109%	79%	57%
Dense Urban	366%	238%	155%	101%	72%	52%	38%	27%

Jak widać wprowadzenie rozpatrywanej modyfikacji w sieci LTE pozwoli na wydłużenie okresu obsługi założonego poziomu ruchu o 2-3 lata, jednak w większości przypadków nie zapewni utrzymania założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Oznacza to, że w przypadku środowiska wielkomiejskiego w okresie najbliższych 2-3 lat niezbędne będzie wprowadzenie nowych stacji 5G. Z kolei w przypadku środowiska miejskiego nowe stacje 5G powinny zostać uruchomione w okresie następnych 4-5 lat. Natomiast w przypadku środowiska podmiejskiego, w niektórych miastach, dzięki zwiększeniu zasobów w sieci LTE nie będzie w ogóle konieczności uruchamiania nowych stacji 5G (Gdańsk, Katowice), albo będzie ona oddalona w czasie o 6-7 lat dla części analizowanych miast (Warszawa, Kraków, Poznań) lub 4 lata dla pozostałych.

Drugi z analizowanych scenariuszy zakładał utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, oraz dołożenie warstwy nośnej sieci 5G w paśmie 700 MHz. Jako punkt wyjścia przyjęto tzw. „dobrą" (obecną) konfigurację stacji bazowych, a w kolejnych krokach wyznaczano liczbę zasobów w sieci 5G w paśmie 700 MHz niezbędną do obsługi założonego poziomu ruch w roku 2025, w poszczególnych środowiskach propagacyjnych, przy założeniu, że rozstawienie (gęstość) stacji bazowych nie ulegną zmianie. W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano minimalne zasoby systemu 5G w paśmie 700 MHz niezbędne do utrzymania założonej jakości obsługi abonentów w 2025 roku. Uzyskane wyniki pokazały, że w większości przypadków, że nie będzie fizycznej możliwości realizacji tego scenariusza budowy sieci, gdyż wymagane zasoby znacząco przekraczają te dostępne w tym paśmie. Wniosek z tego jest następujący, uruchomienie tylko warstwy 5G w paśmie 700 MHz nie wystarczy do zaspokojenia potrzeb użytkowników sieci w 2025 roku.

Trzeci analizowany scenariusz zakładał utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, oraz dołożenie warstw nośnych sieci 5G w pasmach 700 MHz, 2.6 GHz oraz 3.4 - 3.8 GHz. Podobnie jak poprzednio, jako punkt wyjścia przyjęto tzw. „dobrą" (obecną) konfigurację stacji bazowych i w kolejnych krokach wyznaczano liczbę zasobów w sieci 5G w poszczególnych pasmach niezbędne do obsługi założonego poziomu ruch w roku 2025, w poszczególnych środowiskach propagacyjnych, przy założeniu, że rozstawienie (gęstość) stacji bazowych nie ulegnie zmianie. Zgodnie z sugestią operatorów sieci komórkowych przyjęto założenie, że w przeprowadzanej analizie w pierwszej kolejności należy wykorzystać zasoby z pasma 700 MHz (szerokość kanału 10 MHz), następnie zasoby z pasma 3.4 – 3.8 GHz i w razie konieczności zasoby z pasma 2.6 GHz. W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano wymagane konfiguracje stacji bazowych, zawierające minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku w rozpatrywanych miastach. Wynikowa konfiguracja obejmowała tylko zasoby w pasmach 700 MHz i 3.4 – 3.8 GHz, jednak warto tu podkreślić, że zgodnie z sugestią operatorów zasoby wykorzystane w paśmie 700 MHz ograniczono do 10 MHz i w związku z tym zasoby wymagane w paśmie 3.4 - 3.8 GHz musiały być odpowiednio większe. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w części analizowanych obszarów nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz.

Ostatni analizowany scenariusz zakładał utrzymanie obecnego stanu w zakresie częstotliwości, oraz dołożenie warstw nośnych sieci 5G w pasmach 700 MHz, 2.6 GHz oraz 3.4 – 3.8 GHz przy jednoczesnym dwukrotnym zwiększeniu liczby stacji bazowych. Jako punkt wyjścia ponownie przyjęto tzw. „dobrą" (obecną) konfigurację stacji bazowych i w kolejnych krokach wyznaczano liczbę zasobów w sieci 5G w poszczególnych pasmach niezbędne do obsługi założonego poziomu ruchu w roku 2025, w poszczególnych środowiskach propagacyjnych. Podobnie jak w poprzednio zgodnie z sugestią operatorów sieci komórkowych przyjęto założenie, że w przeprowadzanej analizie w pierwszej kolejności należy wykorzystać zasoby z pasma 700 MHz (szerokość kanału 10 MHz), następnie zasoby z pasma 3.4 – 3.8 GHz i w razie konieczności zasoby z pasma 2.6 GHz. W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano wymagane konfiguracje stacji bazowych, zawierające minimalne zasoby systemu 5G w poszczególnych pasmach, które pozwolą na obsługę założonego poziomu ruchu w sieci i zapewnią utrzymanie wymaganej jakości obsługi abonentów w 2025 roku w rozpatrywanych miastach. Podobnie jak w scenariuszu 3 wynikowa konfiguracja obejmowała tylko zasoby w pasmach 700 MHz i 3.4 – 3.8 GHz i tak samo w związku o ograniczeniem dostępnych zasobów w paśmie 700 MHz do 10 MHz wymagane było wykorzystanie odpowiednio większych zasobów w paśmie 3.4 - 3.8 GHz. Gdyby wykorzystać 30 MHz z zasobów dostępnych w paśmie 700 MHz, wówczas w większości

przypadków nie byłoby potrzeby uruchamiania warstwy 5G w paśmie 3.4 - 3.8 GHz. W niektórych przypadkach w środowisku podmiejskim (Gdańsk, Katowice) dwukrotne zwiększenie liczby stacji bazowych spowodowało, że nie będzie konieczności wykorzystywania nowych zasobów sieci 5G.

Poniższa tabela zawiera zbiorcze zestawienie wymaganych zasobów (rozumianych jako szerokości kanałów w [MHz]) dla poszczególnych miast i rozpatrywanych scenariuszy, przy czym scenariusze 3A i 4A uwzględniają wykorzystanie tylko 10 MHz z zasobów w paśmie 700 MHz, a scenariusze 3B i 4B odpowiednio wykorzystanie 30 MHz.

Tabela 144. Zbiorcze wynik analizy pojemnościowej prezentujące wymagane zasoby w [MHz] w poszczególnych obszarach dla rozpatrywanych scenariuszy

Scenariusz	2	3A		3B		4A		4B	
Pasmo	5G 700	5G 700	5G 3600	5G 700	5G 3600	5G 700	5G 3600	5G 700	5G 3600
Polska									
Rural	70	10	60	30	40	10	25	30	5
Suburban	30	10	20	30	-	10	-	30	-
Urban	30	10	20	30	-	10	-	30	-
Dense Urban	45	10	35	30	15	10	10	30	-
Warszawa									
Suburban	15	10	5	30	-	10	-	30	-
Urban	35	10	25	30	5	10	5	30	-
Dense Urban	75	10	65	30	45	10	25	30	5
Kraków									
Suburban	25	10	15	30	-	10	-	30	-
Urban	35	10	25	30	5	10	5	30	-
Dense Urban	50	10	40	30	20	10	10	30	-
Łódź									
Suburban	50	10	40	30	20	10	10	30	-
Urban	20	10	10	30	-	10	-	30	-
Dense Urban	45	10	35	30	15	10	10	30	-
Wrocław									
Suburban	50	10	40	30	20	10	10	30	-
Urban	20	10	10	30	-	10	-	30	-
Dense Urban	45	10	35	30	15	10	10	30	-
Gdańsk									
Suburban	5	10	-	30	-	-	-	-	-
Urban	25	10	15	30	-	10	-	30	-
Dense Urban	60	10	50	30	30	10	20	30	-
Poznań									
Suburban	20	10	10	30	-	10	-	30	-
Urban	15	10	5	30	-	10	-	30	-
Dense Urban	40	10	30	30	10	10	5	30	-
Bydgoszcz									
Suburban	50	10	40	30	20	10	10	30	-
Urban	30	10	20	30	-	10	5	30	-
Katowice									
Suburban	5	10	-	30	-	-	-	-	-
Urban	25	10	15	30	-	10	-	30	-
Dense Urban	55	10	45	30	25	10	15	30	-

Uzyskane w ramach Zadania A wyniki stanowią wsad do realizacji Zadania B: Symulacja możliwości rozbudowy sieci telekomunikacyjnej w reprezentatywnych lokalizacjach w Polsce, w celu przeprowadzenia szczegółowej analizy rozkładu gęstości promieniowania mocy dla wybranych lokalizacji w poszczególnych typach zabudowy. W Zadaniu B, na podstawie opracowanych w Zadaniu A konfiguracji stacji bazowych dla poszczególnych scenariuszy, zostanie przeprowadzona analiza symulacyjna rozkładu gęstości promieniowania mocy obejmująca w szczególności porównanie z przyjętymi wielkościami PEM dla każdego z analizowanych typów terenu i odpowiadającej mu zabudowy.

Literatura

[1] Cisco (2014). Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018. San Jose: Cisco Systems, Inc.

[2] Cisco (2015). Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014–2019. San Jose: Cisco Systems, Inc.

[3] Cisco (2016). Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020. San Jose: Cisco Systems, Inc.

[4] Cisco (2017). Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021. San Jose: Cisco Systems, Inc.

[5] Czapiński, J., Panek, T. (red.) (2015). Diagnoza Społeczna 2015. Warunki i jakości życia Polaków. Warszawa: Rada Monitoringu Społecznego.

[6] Dergiades, T., & Dasilas, A. (2010). Modelling and forecasting mobile telecommunication services: the case of Greece. Applied Economics Letters, 17(18), 1823-1828.

[7] Główny Urząd Statystyczny (2017a). Prognoza ludności gmin na lata 2017-2030 (opracowanie eksperymentalne). Warszawa: Zakład Wydawnictw Statystycznych.

[8] Główny Urząd Statystyczny (2017b). Społeczeństwo informacyjne w Polsce. Wyniki badań statystycznych z lat 2013-2017. Warszawa: Zakład Wydawnictw Statystycznych.

[9] Elnegaard, N., Stordahl, K., Lydersen, J., & Eskedal, T. (2008). Mobile broadband evolution and the possibilities. Telektronikk, 104(3/4), 63-73.

[10] Ericsson (2015a). Ericsson Mobility Report. On the pulse of the networked society. June 2015. Stockholm: Ericsson.

[11] Ericsson (2015b). Ericsson Mobility Report. On the pulse of the networked society. November 2015. Stockholm: Ericsson.

[12] Ericsson (2016a). Ericsson Mobility Report. On the pulse of the networked society. June 2016. Stockholm: Ericsson.

[13] Ericsson (2016b). Ericsson Mobility Report. On the pulse of the networked society. November 2016. Stockholm: Ericsson.

[14] Ericsson (2017a). Ericsson Mobility Report. June 2017. Stockholm: Ericsson.

[15] Ericsson (2017b). Ericsson Mobility Report. November 2017. Stockholm: Ericsson.

[16] Hamoudia, N., & Islam, T. (2004). Modelling and forecasting the growth of wireless messaging. Telektronikk, 100(4), 64-69.

[17] Kucharavy, D., & De Guio, R. (2011). Logistic substitution model and technological forecasting. Procedia Engineering, 9, 402-416.

[18] Kovács, I., Mogensen, P., Christensen, B., & Jarvela, R. (2011). Mobile broadband traffic forecast modeling for network evolution studies. Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2011 IEEE, 1-5.

[19] Lee, S., Cho, C., Hong, E. K., & Yoon, B. (2016). Forecasting mobile broadband traffic: Application of scenario analysis and Delphi method. Expert Systems with Applications, 44, 126-137.

[20] Tao, J. (2010). Research on gompertz curve model used for mobile user growth. In Educational and Network Technology (ICENT), 2010 International Conference, 557-560.

[21] Trappey, C., & Wu, H. (2008). An evaluation of the time-varying extended logistic, simple logistic, and Gompertz models for forecasting short product lifecycles. Advanced Engineering Informatics, 22(4), 421-430.

[22] Urząd Komunikacji Elektronicznej (2017). Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w 2016 roku. Warszawa: Urząd Komunikacji Elektronicznej.
[23] CISCO, „The Zettabyte Era: Trends and Analysis", White paper, June 2017
[24] CISCO, „Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021", White paper, June 2017
[25] Główny Urząd Statystyczny, „Powierzchnia i ludność w przekroju terytorialnym w 2017 r", Warszawa, 2017
[26] 3GPP TS 36.101 V15.0.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception, 2017
[27] 3GPP TS 36.213 V14.4.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedur es (Release 14), 2017
[28] 3GPP TS 36.306 V14.4.0, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 14), 2017
[29] 3GPP TS 36.104 v15.0.0 *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception*, 2017
[30] 3GPP TS 25.104 v15.0.0, *Technical Specification Group Radio Access Network, Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD)*, 2017
[31] 3GPP TS 25.101 v15.0.0, *Technical Specification Group Radio Access Network, User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD)*, 2017
[32] 3GPP TS 38.104 V1.0.0, Technical Specification Group Radio Access Network; Base Station (BS) radio transmission and Deception (Release 15), 2017
[33] Holma H, Toskala A, LTE for UMTS Evolution to LTE-Avanced, Second Edition, Wiley 2011
[34] Holma H, Toskala A,WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE, Fourth Edition, Wiley 2007
[35] LTE System Specifications and their Impact on RF & Base Band Circuits, Application Note, Rohde Schwarz 2013
[36] LTE- Advanced (3GPP Rel12) Technology Introduction White Paper, Rohde Schwarz 2014
[37] Sesia S, Toufik I, Baker M, LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory To Practice, Second Edition, Wiley, 2011
[38] COST 231 Final Report, Digital mobile radio towards future generation systems, 1999
[39] Rappaport T. S., Wireless Communications: Principles and Practice, Prentice Hall PTR, 2002
[40] Wesołowski K., Systemy radiokomunikacji ruchomej, WKŁ, 2003
[41] Grzybkowski M J Przeznaczenie widma częstotliwości radiowych dla systemów bezprzewodowych 5G, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne 6/2017
[42] Resolution 238 (WRC-15), Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 2425 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond, 2015
[43] European Comission, RadioSpectrum Policy Group, Strategic Roadmap Towards 5G for Europe, Opinion on spectrum related aspects for next-generation wireless systems (5G), 2016
[44] ITU-R Final Acts WRC-15, World Radiocommunication Conference Genewa, 2015

Załączniki

Załącznik 1 – Model „zapotrzebowanie-podaż” w zakresie usług transmisji danych dla obszaru Polski w perspektywie do roku 2025 w postaci pliku skompresowanego „Model_5G.zip”.