

Analiza symulacyjna postulowanych zmian w ciągu III oraz II obwodnicy Krakowa i ich oddziaływania na układ drogowy miasta pod kątem potencjalnego zjawiska ruchu wzbudzonego¹

ARKADIUSZ DRABICKI

mgr inż., Politechnika Krakowska, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, email: adrabicki@pk.edu.pl

ANDRZEJ SZARATA

dr hab. inż., prof. PK, Politechnika Krakowska, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, email: aszarata@pk.edu.pl

RAFAŁ KUCHARSKI

dr inż., Politechnika Krakowska, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, email: rkucharski@pk.edu.pl

Streszczenie: Niniejsza praca przedstawia wyniki analiz symulacyjnych pod kątem zjawiska tzw. ruchu wzbudzonego, które można często obserwowwać przy projektach rozbudowy układu drogowego w miastach: realizacja inwestycji takich jak budowa bezkolizyjnych tras, poszerzanie dróg itd. przynosi tylko chwilową poprawę („ulgę”) dla ruchu samochodowego, a po pewnym czasie korzyści z realizacji projektu są dużo niższe lub mogą wręcz całkowicie zaniknąć. Zjawisko to jest związane z tzw. elastyczną reakcją popytu drogowego, czyli pojawieniem się dodatkowej liczby podróży samochodowych w wyniku poprawy warunków podróżowania w sieci drogowej. Jest to o tyle istotne zjawisko, że już nawet niewielki poziom wzbudzenia ruchu wyraźnie niweluje początkową poprawę w parametrach podróży – a niekiedy może nawet przesądzić o nieefektywności danej inwestycji. W artykule omówiono wyniki prac przeprowadzonych na modelu makrosymulacyjnym miasta Krakowa, gdzie analizom poddano projekty przemian układu drogowego w zachodniej części miasta: budowa III obwodnicy (Trasa Zwierzyniecka, Pychowicka i Łągiewnicka) oraz możliwe dalsze zwężenie II obwodnicy (Aleje Trzech Wieszców). W analizach symulacyjnych przedstawiono, jak potencjalnie może zmienić się obraz funkcjonowania sieci drogowej w wyniku uwzględnienia reakcji w zachowaniach podróżnych (elastyczność popytu). Jak pokazują wyniki prognoz, budowa III obwodnicy przyniesie co prawda wyraźną poprawę warunków podróżowania w sieci drogowej, ale pojawienie się ruchu wzbudzonego w znacznym stopniu zniweluje skalę oczekiwanych korzyści – i dopiero dalsze ograniczanie ruchu w korytarzu II obwodnicy pozwoli na skuteczną redukcję uciążliwości ruchu drogowego w obszarze śródmieścia. Co więcej, okazuje się, że w kontekście budowy III obwodnicy – po uwzględnieniu zjawiska elastyczności popytu – dalsze zwężenie II obwodnicy nie będzie skutkowało znaczącym pogorszeniem parametrów podróży w skali całego miasta (mierzonych np. prędkością średnią). Wskazuje to zatem, że realizacja obu projektów drogowych wydaje się być rozwiązaniem optymalnym w kontekście długofalowej strategii kształtowania układu transportowego Krakowa.

Słowa kluczowe: Kraków, model transportowy, III obwodnica, elastyczność popytu, ruch wzbudzony.

Wprowadzenie

Obserwowana obecnie dynamika rozwoju społeczno-gospodarczego oraz nasilenie procesów urbanizacyjnych w polskich miastach skutkują stale zwiększającą się presją na miejskie (aglomeracyjne) systemy transportowe.

Szczególnie istotny jest tutaj wzrost liczby podróży wykonywanych transportem drogowym, powiązany z rozwojem poziomu mobilności polskiego społeczeństwa, a także postępującym zjawiskiem motoryzacji: wg danych GUS [1] średni wskaźnik motoryzacji w Polsce w 2015 roku wyniósł około 540 pojazdów osobowych/1000 mieszkańców. Jest to wartość wyższa od średniej dla 28 krajów Unii Europejskiej (około 490 poj. osobowych/1000 mieszkańców w 2015 roku [2]) i na wyższym poziomie niż w krajach takich jak Francja, Wielka Brytania czy Szwecja, oraz bardzo zbliżona do Niemiec czy Austrii. Co więcej, zjawisko motoryzacji jest nasilone głównie w obszarach miejskich i aglomeracyjnych w Polsce: w wielu miastach wojewódzkich współczynnik motoryzacji jest wyższy od średniej krajowej, nierzadko powyżej 600 poj./100 mieszkańców, i pomimo pewnego spowolnienia tempa wzrostu w największych miastach (np. Warszawa, Kraków) w dalszym stopniu obserwuje się nasilenie zjawiska motoryzacji w obszarach zurbanizowanych.

W odpowiedzi na ową rosnącą presję w ostatnich latach podejmuje się znaczące działania inwestycyjne w sieciach drogowych miast Polski. Poprzez działania takie jak likwidacja tzw. wąskich gardeł budowa nowych tras radialnych i obwodowych, poszerzanie istniejących dróg, rozwój sieci dróg szybkiego ruchu itd. dąży się do skrócenia czasów i odległości podróży, zmniejszenia kongestii drogowej oraz poprawy dostępności sieci transportowej. W wielu przypadkach jest to niezbędne ze względu na skalę „zapóźnień” w rozwoju infrastruktury drogowej, szczególnie w kontekście zmniejszenia uciążliwości związanych z prowadzeniem znacznego ruchu drogowego przez obszary zurbanizowane oraz usprawnienia warunków podróżowania pomiędzy większymi ośrodkami miejskimi.

Jednakże często też można obserwować, że początkowa poprawa warunków ruchu, wynikająca z realizacji danego projektu drogowego, jest krótkotrwała, a po pewnym czasie następuje ponowne nasilenie zjawiska kongestii drogowej. Prowadzi to do paradoksu, w którym działania inwestycyjne przynoszą tylko krótkotrwałą poprawę warunków podróżowania, a długofalowo mogą być wręcz kontrproduktywne, przynosząc efekt znacząco (bądź całkowicie) odmienny od zamierzonego. Paradoks ten został zaobserwowany już w wielu miastach na świecie i jest w literaturze

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2018. Wkład autorów w publikację: A. Drabicki 70%, A. Szarata 20%, R. Kucharski 10%

znany głównie pod nazwą tzw. paradoksu Downs'a-Thomson'a [3], [4] bądź też prawa Lewis'a-Mogridge'a [5], [6]. Został on także zauważony w pracy profesora Olszewskiego i profesora Suchorzewskiego [7], którzy sformułowali hipotezę mówiącą, że atrakcyjność podróży samochodem i stopień jego wykorzystania zależy od przepustowości układu drogowego i pojemności parkingu, a w mniejszym stopniu od sprawności komunikacji zbiorowej i relacji kosztów. Jest on ściśle związany ze zjawiskiem tzw. ruchu wzbudzonego, tj. dodatkowej aktywności ruchowej spowodowanej samą tylko poprawą warunków podróżowania w sieci drogowej [8].

Istotnym wydaje się być zatem wykorzystanie metod i narzędzi analitycznych, które pozwolą ocenić potencjalne skutki projektów inwestycyjnych w obszarach miejskich i w szerszym ujęciu prognozować wynikowe funkcjonowanie sieci transportowej. Wyniki tych analiz stanowią następnie podstawę do dalszej analizy kosztów i korzyści danego projektu drogowego, oceny jego efektywności – a to w odpowiedzi pozwala definiować bardziej efektywne scenariusze kształtowania sieci drogowych w obszarach zurbanizowanych.

W artykule przedstawiono wyniki analiz przeprowadzonych w modelu symulacyjnego systemu transportowego Krakowa [9]. Analizie poddano tutaj koncepcje przekształceń zachodnich odcinków tzw. III obwodnicy (Trasa Zwierzyniecka, Pychowicka, Łagiewnicka) oraz II obwodnicy (Aleje Trzech Wieszców) Krakowa – tj. projektów, które mogą w zasadniczy sposób wpłynąć na funkcjonowanie systemu transportu drogowego w skali miasta. Celem analiz było ukazanie, jak istotny może być wpływ potencjalnego wzbudzenia (lub stłumienia) dodatkowego ruchu drogowego wynikającego z realizacji tych projektów inwestycyjnych. Na tej podstawie możliwe jest sformułowanie wniosków dot. efektywnej strategii kształtowania sieci drogowej – w kontekście tego, jak dążyć do jednoczesnej poprawy warunków ruchu w sieci drogowej i zmniejszenia uciążliwości ruchowych w obliczu elastycznej reakcji po stronie popytu drogowego.

Modelowanie zjawiska ruchu wzbudzonego (tłumionego) powodowanego zmianami w stanie sieci (infrastruktury) drogowej

Powyżej opisany paradoks związany jest ściśle z tzw. zjawiskiem ruchu wzbudzonego bądź tłumionego, tj. zmiany liczby podróży, która wynika z samej tylko zmiany warunków podróżowania w sieci drogowej [8]. Zwiększenie aktywności ruchowej może nastąpić w wyniku projektów dążących do polepszania warunków podróżowania – np. budowy nowych tras drogowych, poszerzenia dróg, budowy skrzyżowań bezkolizyjnych, dobudowy dodatkowych pasów ruchu itd. – czyli projektów przynoszących poprawę przepustowości i prędkości podróży, które generują dodatkowy ruch odbywany w danych relacjach podróży. Według literatury [8], [10] na ruch generowany (wzbudzony) (z ang. *generated (induced) traffic*) poprawą warunków w sieci składają się dwa zasadnicze czynniki:

- *Ruch przejęty (diverted traffic)* – zmiany w obrębie obecnie wykonywanej już liczby podróży źródło – cel. Zmiany te wynikają z tzw. *triple convergence effect* [11], czyli przejścia podróży: z innych tras podróżowania (przesunięcie przestrzenne), z innych pór czasowych (przesunięcie czasowe) oraz z innych środków transportu (przesunięcie modalne).
- *Ruch wzbudzony (induced traffic)* – dodatkowa liczba podróży pojawiająca się w systemie transportowym, którą można podzielić na dwie kategorie:
 - o Na pierwszą kategorię (*ruch bezpośrednio wzbudzony*) składają się zmiany krótkofalowe, czyli dodatkowe podróże wynikające ze zmian celów podróży (np. zmiana miejsca pracy lub zakupów), zmian w łańcuchach podróży (np. dodatkowe punkty podróży „po drodze”) oraz zwiększenia częstotliwości wykonywania podróży.
 - o W drugiej kategorii (*ruch pośrednio wzbudzony*) zawierają się zmiany, które nie wynikają już bezpośrednio z poprawy czasów i warunków podróży, ale odzwierciedlają długofalowe zmiany w aktywności ruchowej, które są w pewnym stopniu skorelowane z rozwojem układu drogowego – czyli nowe podróże wynikające ze zmian w zagospodarowaniu przestrzennym, nowej zabudowy, zmian stylu życia itd.

Analogicznie, podejmowanie działań zmierzających do ograniczenia przepustowości czy prędkości w sieci drogowej może zniechęcać do podejmowania podróży – np. zamknięcia lub zwężenia ulic, które mogą prowadzić do pogorszenia warunków i czasu przejazdu, a także wzrostu zatłoczenia drogowego. Wówczas można mówić o ruchu tłumionym (*suppressed traffic*), czyli zmniejszonej aktywności ruchowej, na którą składają się analogiczne zmiany w zachowaniach transportowych, jak opisano powyżej – czyli przesunięcie (odpływ) podróży na rzecz innych tras, środków, pór czasowych podróży, ograniczenie lub rezygnacja z odbywanych podróży itd. [12].

Ruch wzbudzony jest zjawiskiem charakterystycznym dla miejskich sieci drogowych i został już szeroko zaobserwowany i opisany w literaturze badawczej (obszerną listę wniosków i źródeł można znaleźć w pracach m.in. [3], [4], [8], [10], [13]). W wielu tych pracach obserwuje się, że jest on powiązany z realizacją projektów w sieciach drogowych na obszarach miejskich, które w okresach ruchu szczytowego znajdują się na wysokim stopniu wykorzystania przepustowości i w których zawsze utrzymuje się znaczące zapotrzebowanie na obsługę transportową. W takich warunkach następuje „uwolnienie” dodatkowej liczby podróży, które pojawiają się na większym obszarze miasta – i początkowo prowadzą do wyczerpania przepustowości w punktach krytycznych sieci (np. skrzyżowaniach), a w wyniku szerszego efektu sieciowego skutkują pogorszeniem ogólnych warunków podróżowania w mieście. Wielokrotnie można obserwować, że projekty drogowe przynoszą początkowo pozytywne efekty w postaci zmniejszenia kongestii drogowej i skrócenia czasów podróży, ale już po paru

latach efekty te są znacznie mniejsze lub całkowicie zanikają – a i nierzadko parametry podróży mogą być gorsze niż przed realizacją inwestycji.

Zjawisko to jest dobrze rozpoznane w miastach zachodnich, a w ostatnich latach można je coraz częściej obserwować przy realizacji projektów transportowych w miastach Polski. Wpływ ruchu wzbudzonego (tłumionego) jest dobrze widoczny na przykładzie przepraw mostowych w Warszawie, gdzie ekran rzeki Wisły stanowi jeden z punktów krytycznych stołecznej sieci drogowej. W 2003 roku oddano do użytku most Siekierski, który miał w znacznym stopniu rozwiązać problemy komunikacyjne w południowej części Warszawy. O ile w pierwszym roku użytkowania ruch w godzinie szczytu wynosił około 2600 poj./godz. w kierunku, to wartość ta wzrastała z roku na rok i już w 2007 roku natężenie ruchu przekroczyło zakładaną przepustowość mostu, a od 2009 roku utrzymywało się na poziomie około 5800 poj./godz. w kierunku [14] – co oznacza, że jest to odcinek sieci podatny na tworzenie się wielokilometrowych zatorów drogowych w godzinach szczytu. Zjawisko to wynikało właśnie ze wzbudzenia ruchu, który nastąpił m.in. dzięki (początkowo) znaczącej poprawie warunków podróżowania pomiędzy dużymi generatorami ruchu w południowej Warszawie, a w konsekwencji miało szerszy efekt sieciowy – pomiary miejskie wykazały, że w tym samym czasie sumaryczny ruch samochodowy wzdłuż ekranu Wisły zwiększał się corocznie w tempie około 3%. Efekt wzbudzenia ruchu widoczny był także na trasach dojazdowych (tj. al. Czerniakowskiej i Witosy), gdzie – o ile natężenie ruchu przed otwarciem mostu Siekierskiego oscylowało na poziomie około 70–80% przepustowości, to w 2005–2006 wartość ta osiągała już 100–120%.

Innym ciekawym przykładem było nagłe zamknięcie mostu Łazienkowskiego w 2015 roku na okres około 10 miesięcy – przeprawy mostowej o kluczowym znaczeniu w śródmieściu Warszawy, która przenosi średnio około 100 tysięcy pojazdów na dobę w przekroju. Pomiar ruchu wykazał wówczas, że na trzech sąsiednich przeprawach mostowych przybyło tylko 50 tysięcy pojazdów w dobie [15]. Owe „brakujące” około 50 tysięcy pojazdów, czyli pozostałe zmiany zachowań transportowych, można tłumaczyć jako klasyczny przykład ruchu tłumionego – czyli przesunięcie podróży w kierunku innych środków transportu (autobusu, metra), zmianę celów i łańcuchów podróży (tj. bez konieczności przekraczania Wisły) oraz rezygnacja z podróży.

Uwzględnienie wzbudzenia (tłumienia) ruchu ma bardzo istotne znaczenie w ocenie efektywności projektów drogowych. Według zaleceń JASPERS w analizach studialnych należy brać pod uwagę możliwość zmian aktywności ruchowej, czyli tzw. elastyczności popytu (*demand elasticity*) w reakcji na poszczególne scenariusze rozwoju sieci drogowej [16]. W pracach badawczych podkreśla się, że analizy prowadzone przy założeniu sztywnego poziomu popytu drogowego mają tendencję do przeszacowywania korzyści z projektów drogowych, a już nawet niewielkie zmiany

w wielkości popytu (nawet rzędu kilku procent) mogą mieć bardzo duży wpływ na wyniki końcowej analizy kosztów i korzyści [10] – a w niektórych przypadkach przesądzić o nieefektywności danego projektu [17]. Wynika to z faktu, że ruch wzbudzony powoduje – po pierwsze – dalszy wzrost kosztów podróży dla wszystkich użytkowników w sieci drogowej, która już osiągnęła dość wysoki poziom nasycenia – a po drugie, sam przynosi stosunkowo niewielkie korzyści, jako że wzbudzenie ruchu dotyczy głównie podróży fakultatywnych (w motywacjach nieobligatoryjnych). Analizy symulacyjne przeprowadzone przez jednego z autorów [8] dla projektu rozbudowy węzła rondo Ofiar Katynia w Krakowie wykazały, że przy uwzględnieniu ruchu wzbudzonego (co oznaczało dodatkowe 3% podróży w skali miasta) prędkość średnia maleje tylko o 0,6 km/h w skali miasta, ale już w samym obszarze oddziaływania inwestycji spada o 3,0 km/h – czyli praktycznie do poziomu sprzed przebudowy.

Analizowane scenariusze – koncepcje kształtowania zachodnich odcinków III oraz II obwodnicy drogowej Krakowa

W dalszych pracach dokonano analizy projektów (zamierzeń) inwestycyjnych dot. miejskiego układu obwodowego Krakowa, które w znacznym stopniu zmieniają warunki podróżowania na szerszym obszarze miasta i zasadniczo wpłyną na funkcjonowanie sieci drogowej w całym Krakowie. Projekty te wpisują się w strategię kształtowania podstawowego układu drogowego Krakowa w oparciu o system 4 obwodnic uzupełnionych połączeniami radialnymi. Wśród projektów inwestycyjnych przewidzianych (lub postulowanych) do realizacji ważne miejsce zajmują koncepcje dot. odciążenia układu drogowego w śródmieściu Krakowa i budowy nowego połączenia obwodowego w zachodniej części miasta:

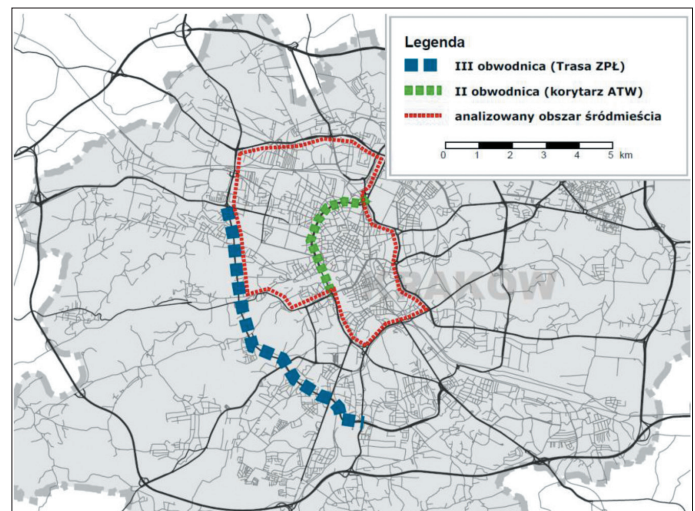
- Budowa zachodniego odcinka tzw. III obwodnicy, tj. ciągu: Trasy Zwierzynieckiej, Trasy Pychowickiej oraz Trasy Łagiewnickiej – zwane dalej Trasą ZPŁ. Jest to inwestycja zapisana w dokumentach strategicznych miasta [18] i obecnie rozpoczęto realizację pierwszego odcinka (Trasy Łagiewnickiej), a na pozostałych odcinkach trwają prace koncepcyjne i projektowe. Trasa ZPŁ projektowana jest jako trasa o podwyższonych parametrach technicznych, tj. w klasie drogi GP o przekroju 2x2 lub 2x3 (między węzłami), powiązana z układem drogowym poprzez węzły częściowo bezkolizyjne. W przyszłości droga ta ma stanowić główne i sprawne połączenie drogowe dużych generatorów ruchu w zachodniej części Krakowa (Bronowice, Krowodrza, Salwator, Dębniki, Ruczaj, Kurdwanów). Wśród głównych argumentów za budową Trasy ZPŁ podkreśla się możliwość wyprowadzenia ruchu drogowego z obszarów śródmiejskich Krakowa – a zwłaszcza z (opisanej niżej) II obwodnicy.
- Przebudowa i zwężenie zachodniego odcinka tzw. II obwodnicy, tj. ciągu Alei Trzech Wieszców (a potencjalnie także i mostu Dębnickiego oraz alei Konopnickiej) – zwane dalej ciągiem ATW. Ciąg ATW stanowi podsta-

wowy korytarz komunikacyjny w zachodniej części śródmieścia Krakowa (i dla transportu drogowego, i dla transportu zbiorowego) i musi przenosić znaczne potoki ruchu lokalnego, międzydzielnicowego i dalekobieżnego, m.in. ze względu na brak alternatywnych połączeń. Skutkuje to wysokim poziomem zatłoczenia motoryzacyjnego i uciążliwości związanych z ruchem drogowym w tym obszarze. Docelowo dokumenty strategiczne [18] przewidują zmniejszenie funkcji ruchowej ciągu ATW i degradację do ulicy klasy Z. W dyskusji nad przyszłością systemu transportowego Krakowa podnosi się różne koncepcje przekształcenia ciągu ATW, w tym postuluje się zwężenie przekroju drogowego do jednego pasa ruchu dla ruchu ogólnego w każdym kierunku (tj. przekrój 1x2 bądź 2x1 z wydzielonymi pasami skrętnymi) w powiązaniu z budową linii tramwajowej lub metrobusowej. Podkreśla się, że koncepcja zwężenia ATW pozwoliłaby na skuteczne ograniczenie uciążliwości związanych z ruchem drogowym, emisji hałasu i zanieczyszczeń, a także przyczyniłaby się do poprawy jakości przestrzeni publicznej na tym obszarze.

W debacie nad rozwojem sieci drogowej Krakowa podkreśla się, że obydwie projekty są synergiczne i ściśle ze sobą powiązane. Realizacja Trasy ZPŁ, oprócz poprawy dostępności zachodnich dzielnic Krakowa, ma umożliwić – poprzez przejęcie ruchu międzydzielnicowego obsługiwanego obecnie przez ciąg ATW – ograniczenie ruchu samochodowego w śródmieściu oraz redukcję znaczenia korytarza ATW do obsługi ruchu lokalnego. Jednakże w świetle przytoczonej wcześniej problematyki należy zauważyć, że projekty te w znacznym stopniu zmieniają pojemność układu drogowego i warunki podróżowania w mieście – a jednocześnie będą realizowane w warunkach wysokiego nasycenia sieci transportowej i wysokiej presji podróżniczej. Stąd też w ocenie ich efektywności konieczne wydaje się sprawdzenie, jaki będzie wpływ elastycznej reakcji popytu drogowego – czyli wzbudzenia (tłumienia) ruchu – na parametry podróży, a w konsekwencji – jaki kierunek działań pozwoli na spełnienie najważniejszych celów (oczekiwań) dot. kształtowania sieci drogowej Krakowa.

Metodyka i założenia analiz symulacyjnych

Prace analityczne zostaną przeprowadzone z wykorzystaniem Krakowskiego Modelu Ruchu (KMR), tj. makrosymulacyjnego modelu systemu transportowego Krakowa i gmin ościennych stworzonego z pomocą oprogramowania PTV VISUM [9]. Model ten został opracowany w ramach Kompleksowych Badań Ruchu przeprowadzonych w Krakowie w 2013 roku. Do analiz wykorzystany zostanie model prognostyczny opracowany dla roku 2025 – zawierający założenia dot. modelu popytu (zmian w aktywności ruchowej) oraz modelu sieci (zmian w strukturze sieci drogowej) prognozowane dla tego horyzontu czasowego. Symulacje zostaną przeprowadzone dla modelu opracowanego dla godziny szczytu porannego (7:30–8:30).



Rys. 1. Założenia dot. sieci drogowej w wariantach inwestycyjnych W1 i W2.

Źródło: opr. własne

Prognostyczny model sieci przyjęty jako tło do analiz (tj. wariant bezinwestycyjny W0) został uzupełniony o inwestycje drogowe, jakie wg założeń zostaną zrealizowane do 2025 roku – w tym ważniejsze projekty drogowe:

- domknięcie IV obwodnicy, tj. budowa odcinków dróg ekspresowych S7 i S52;
- budowa połączeń radialnych pomiędzy IV i III obwodnicą: Trasa Balicka, Trasa Skawińska, Trasa Wollbromska, poszerzenie alei 29 Listopada i Okulickiego;
- rozbudowa ulicy Igołomskiej (DK 79) na terenie Krakowa;
- budowa ulicy Miłosza (połączenie ulicy Wita Stwosza i ulicy Doktora Twardego).

Dla modelu sieci drogowej zdefiniowano następnie dwa warianty inwestycyjne:

- wariant W1: budowa Trasy ZPŁ na całej długości od alei Armii Krajowej do alei Witosza; założona parametryzacja: klasa GP, prędkość w ruchu swobodnym 70–80 km/h, przepustowość 2000–2500 poj./godz. w kierunku;
- wariant W2: wariant W1 rozszerzony o zwężenie korytarza ATW na odcinku od ulicy Wita Stwosza do ronda Grunwaldzkiego; założona parametryzacja: klasa Z, prędkość w ruchu swobodnym 45 km/h, przepustowość 1000 poj./godz. w kierunku.

W kolejnym kroku sformułowano zależność dot. elastyczności popytu drogowego, która w pracach analitycznych jest najczęściej opisywana za pomocą tzw. stopy elastyczności popytu. Parametr ten definiuje się jako iloraz różnicy w mierze natężenia ruchu (tj. ilość pojazdów lub pojazdów-kilometrów w danej jednostce czasu) do różnicy w mierze warunków ruchu (tj. czas podróży lub poziom swobody ruchu), mierzonej przed i po realizacji inwestycji drogowej. Stopę elastyczności popytu $\mathcal{E}_{ij}^{w_x}$ można przedstawić za pomocą równania (1), które stanowi klasyczny opis tej zależności, nadający się do zastosowania w modelach symulacyjnych [8], [10]:

$$\varepsilon_{ij}^{W_x} = \frac{d_{ij}^{W_x} - d_{ij}^{W_0}}{-(t_{a,ij}^{W_x} - t_{a,ij}^{W_0})} \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon_{ij}^{W_x}$ – stopa elastyczności popytu [-] dla projektu (wariantu) inwestycyjnego W_x ,

$d_{ij}^{W_x}, d_{ij}^{W_0}$ – liczba podróży [poj./h] z rejonu i do rejonu j , odpowiednio w: w wariancie inwestycyjnym W_x oraz w wariancie bezinwestycyjnym W_0 ,

$t_{a,ij}^{W_x}, t_{a,ij}^{W_0}$ – czasy przejazdu samochodem w sieci obciążonej [min] z rejonu i do rejonu j , odpowiednio w: wariancie inwestycyjnym W_x oraz w wariancie bezinwestycyjnym W_0 .

Zgodnie z równaniem 1 spadek kosztu podróży w sieci – tj. redukcja czasów podróży – skutkować będzie pozytywną zmianą liczby podróży pomiędzy danymi rejonami (ruch wzbudzony); a wzrost kosztu podróży – tj. zwiększenie czasów podróży – oznaczać będzie negatywną zmianę liczby podróży (ruch tłumiony).

Wartości stopy elastyczności popytu drogowego są uwarunkowane głównie poziomem nasycenia sieci transportowej, przyjętą miarą odniesienia (tj. natężenie ruchu bądź praca przewozowa), a także horyzontem czasowym analizy i uwzględnionymi kategoriami ruchu generowanego (wzbudzonego) bądź tłumionego. W literaturze podaje się, że stopę elastyczności popytu można szacować mniej więcej na poziomie 0,3–0,8 w ujęciu krótkofalowym oraz do 1,0 – 1,2 w ujęciu długofalowym [8]. W analizach symulacyjnych zaleca się stosowanie wartości rzędu 0,5–0,8 do opisu efektów krótkoterminowych zjawiska ruchu wzbudzonego [17]; podobny rząd wielkości można przyjmować także do modelowania zjawiska ruchu tłumionego [19].

W pracach analitycznych przyjęto wartości stopy elastyczności popytu równe 0,50 oraz 0,80. Takie wartości pozwolą na oszacowanie efektów zmienności popytu drogowego w horyzoncie kilku lat od realizacji inwestycji i uwzględniają one potencjalne zmiany w liczbie podróży wynikające z przesunięcia przestrzennego, czasowego oraz modalnego (*triple-convergence effect*) [11]. Należy tu jednak zauważyć, że nie uwzględniają one efektów długoterminowych, dla których stopa elastyczności będzie prawdopodobnie jeszcze wyższa niż zakładane wartości. Dla uproszczenia przyjęto, że wzbudzenie bądź tłumienie ruchu dotyczy tylko podróży wykonywanych samochodem osobowym (SO) na terenie Krakowa – pominięto tutaj efekty po stronie innych kategorii pojazdów kołowych (SD, SC, SCP), jednakże w praktyce i w tych segmentach należałoby liczyć się ze zmiennością liczby wykonywanych podróży.

W obydwu wariantach inwestycyjnych (W1 i W2) symulacje przeprowadzono z założeniem sztywnego poziomu popytu – tj. macierz podróży SO taka sama, jak w wariancie W0, oraz z uwzględnieniem elastyczności popytu – tj. macierz podróży SO w wariantach W1 i W2 zmieniająca się w zależności od czasów podróży w sieci obciążonej (wskaźnik *TTC*) wg równania (1), z wartością $\varepsilon_{ij}^{W_x}$ wynoszącą 0,5 lub 0,8.

Tabela 1

Sformułowane scenariusze symulacyjne				
Krakowski Model Ruchu – 2025 r.:		stopa elastyczności popytu $\varepsilon_{ij}^{W_x}$		
		0	0,5	0,8
model sieci drogowej	W0	x	-	-
	W1: Trasa ZPŁ	x	x	x
	W2: Trasa ZPŁ, zwężenie ATW	x	x	x

Źródło: opracowanie własne

Wyniki symulacji – zmiany w funkcjonowaniu sieci drogowej wskutek budowy zachodniego odcinka III obwodnicy (W1) oraz dalszego zwężenia zachodniego odcinka II obwodnicy (W2)

Dla obydwu wariantów inwestycyjnych W1 i W2 analizy przeprowadzone przy założeniu sztywności popytu drogowego ($\varepsilon_{ij}^{W_x} = 0$) wskazują, że realizacja Trasy ZPŁ przyniosłaby wyraźną poprawę w skali Krakowa. Nowe połączenie drogowe przejmuje wówczas znaczącą liczbę pojazdów samochodowych z okolicznej sieci drogowej i wyraźnie wpływa na lepsze powiązanie (tj. skrócenie czasów i odległości podróży) w podróżach w zachodniej części Krakowa. Trasa ZPŁ, będąca częścią III obwodnicy, staje się jednym z najbardziej obciążonych odcinków drogowych w mieście, a potok w przekroju mostu Pychowickiego wynosi około 3500–3700 poj./godz. w przekroju (tabela 4).

Zróznicowany jest efekt „odciążenia” II obwodnicy, na którym potok ruchu spada nieznacznie w wariancie W1 (3900 poj./godz.), ale za to wyraźnie maleje w wyniku zwężenia przekroju ATW w wariancie W2 – aż do około 2200 poj./godz. Analogicznie realizacja Trasy ZPŁ skutkuje odciążeniem IV obwodnicy w zachodniej części miasta, gdzie natężenie ruchu spada w porównaniu z wariantem W0 o nawet 700–900 poj./godz. w przekroju. Wyniki wskazują na korzystne zmiany warunków podróżowania samochodem w skali całej sieci – przy realizacji Trasy ZPŁ w wariancie W1 średnia prędkość przejazdu wzrasta do 50,2 km/h; korzyści te są mniejsze, ale również widoczne, w wariancie W2 – gdzie przy dalszym zwężeniu przekroju drogowego ATW prędkość średnia wzrasta do 49,4 km/h (tabela 2).

Tabela 2

Wyniki symulacji – zestawienie parametrów funkcjonowania sieci drogowej							
wariant - 2025 r.	stopa elastyczności $\varepsilon_{ij}^{W_x}$	liczba podróży [poj./h]	parametry eksploatacyjne sieci drogowej - cała sieć (KMR)		prędkość średnia - KMR [km/h]	prędkość średnia - centrum [km/h]	średni czas podróży - KMR [min]
			[poj.-km]	[poj.-godz]			
W0	(n/d)	79 078	981 494	20333	48,3	26,9	15,4
W1 (Trasa ZPŁ)	0	79 078	972 883	19399	50,2	30,6	14,7
	0,5	80 346	989 916	19963	49,6	29,8	14,9
	0,8	81 106	1 000 144	20317	49,2	29,2	15,0
W2 (Trasa ZPŁ, zwężenie ATW)	0	79 078	978 826	19812	49,4	27,5	15,0
	0,5	79 710	988 433	20122	49,1	27,3	15,1
	0,8	80 088	994 257	20314	48,9	27,1	15,2

Źródło: opracowanie własne

Można zatem zauważyć, że przy niezmięnionej więźbie popytu samochodowego budowa III obwodnicy w wariantcie W1 pozwala na znaczne odciążenie układu drogowego w analizowanym obszarze centrum Krakowa (rys. 1), gdzie prędkość średnia wzrasta o 3,7 km/h w porównaniu z wariantem W0. Co więcej, w takiej sytuacji w wariantcie W2 poziom nasycenia układu drogowego nie ulega pogorszeniu, jako że zmiany w korytarzu ATW są kompensowane zwiększeniem przepustowości na kordonie tego obszaru – w efekcie prędkość średnia w centrum jest wciąż nieznacznie wyższa niż w wariantcie bezinwestycyjnym W0 (o 0,6 km/h) (tabela 3).

Tabela 3

Prognozowane zmiany w funkcjonowaniu sieci drogowej Krakowa w wyniku elastycznej reakcji popytu drogowego w wariantach W1 i W2							
wariant - 2025 r.	stopa elastyczności $E_{ij}^{w,x}$	zmiana liczby podróży – ruch wzbudzony		zmiana pracy przewozowej w porównaniu z wariantem W0		wykorzystanie redukcji w [poj.-godz] w wariantach W1, W2 przez ruch wzbudzony	
		Δ [poj./h]		Δ poj.-km [%]		Δ poj.-godz [%]	
		cała sieć (KMR)	KMR	centrum	KMR	centrum	
W1 (Trasa ZPŁ)	0	-	- 0,9%	- 9,8%	-	-	
	0,5	+ 1268	+ 0,9%	- 7,3%	+ 60,4%	+ 21,8%	
	0,8	+ 2028	+ 1,9%	- 5,7%	+ 98,3%	+ 36,0%	
W2 (Trasa ZPŁ, zmniejszenie ATW)	0	-	- 0,3%	- 15,3%	-	-	
	0,5	+ 632	+ 0,7%	- 14,4%	+ 59,6%	+ 8,8%	
	0,8	+ 1010	+ 1,3%	- 13,9%	+ 96,5%	+ 14,2%	

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4

Prognozowane natężenie ruchu drogowego na ekranie Wisły [poj./godz. w przekroju]						
wariant - 2025 r.	stopa elastyczności E_{ij}	autostrada A4 (IV obwodnica)	most Pychowicki (III obwodnica)	most Zwierzyniecki	most Dębnicki (II obwodnica)	SUMA - ekran Wisły
W0	(n/d)	4040	-	1360	4490	27 130
W1	0	3110	3440	950	3880	27 550
	0,5	3270	3570	1050	4030	28 430
	0,8	3360	3660	1110	4110	28 930
W2	0	3350	3670	1250	2240	27 350
	0,5	3460	3760	1290	2270	27 740
	0,8	3520	3820	1330	2290	27 990

Źródło: opracowanie własne

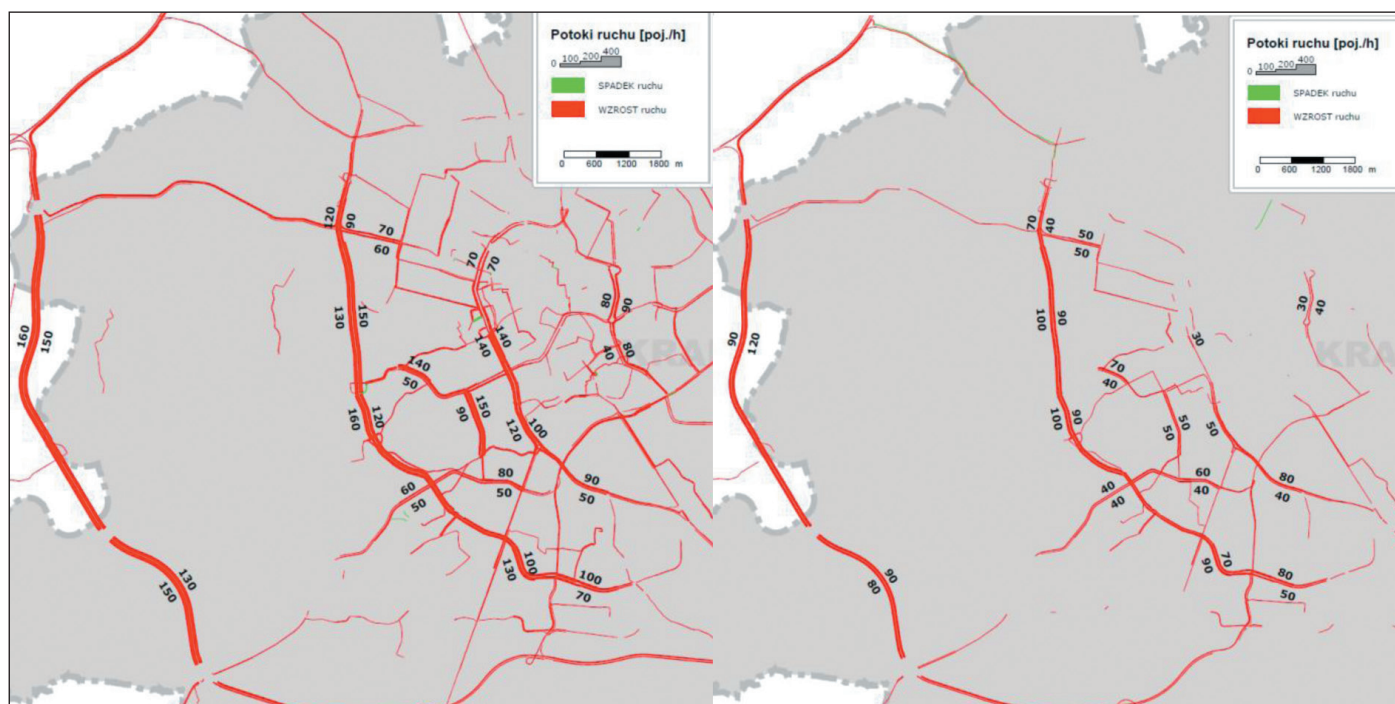
Uwzględnienie elastyczności popytu drogowego wyraźnie za to wpływa na zmianę wynikowych parametrów funkcjonowania sieci drogowej (tabela 2), a zwłaszcza skalę oczekiwanych korzyści w obu wariantach inwestycyjnych (tabela 3). Dla założonych wartości stopy elastyczności popytu ($\varepsilon_{ij}^{w,x} = 0,5$ oraz $0,8$) zmiany w warunkach podróżowania w sieci oznaczają pojawienie się nawet 600–2000 dodatkowych podróży samochodowych w godzinie szczytu.

W wariantcie W1 budowa Trasy ZPŁ bez dalszej ingerencji w układ drogowy w dalszym ciągu przynosi pewną poprawę warunków podróżowania w sieci drogowej, ale już w wyraźnie mniejszej skali niż przy sztywnej więźbie popytu (tabela 2). Uwzględnienie zjawiska wzbudzenia ruchu oznacza pojawienie się kolejnych około 2000 pojazdów w sieci, co oznacza spadek prędkości średniej zarówno w ca-

łej sieci (o 1,0 km/h), jak i w centrum Krakowa (o 1,5 km/h) w odniesieniu do scenariusza sztywnej więźby popytu. Jak pokazano (tabela 3), będzie to miało przełożenie na wyraźnie niższe korzyści z realizacji inwestycji drogowej: wzrasta praca przewozowa (poj.-km) w skali całego modelu, a także następuje wyraźna erozja początkowych redukcji w sumarycznym czasie podróży w sieci (poj.-godz.) – które praktycznie zanikają (w 98%) w skali całego modelu oraz są niższe o 36% w centralnym obszarze analizy.

Na planszy (rys. 2) ukazano skalę generacji dodatkowych podróży w wariantcie W1 na tle sieci drogowej Krakowa – tj. graficzne porównanie potoków ruchu dla elastycznej więźby popytu ($\varepsilon_{ij}^{w,x} = 0,8$) na tle sztywnej więźby popytu ($\varepsilon_{ij}^{w,x} = 0$) w wariantcie W1. Można tutaj zauważyć charakterystyczne i ważne zjawisko w kontekście ruchu wzbudzonego: przyrost podróży samochodowych obserwuje się nie tylko w korytarzu samej inwestycji, ale także w formie szerszego efektu sieciowego (*ripple effect*) [10] na alternatywnych połączeniach drogowych i także na drogach dojazdowych do III obwodnicy. Wyniki symulacji ukazują wzrosty natężenia ruchu rzędu około 200–300 pojazdów/godz. na przeprawach mostowych w przekroju Trasy ZPŁ (III obwodnicy), autostrady A4 (IV obwodnicy), ale nawet i ciągu ATW (II obwodnicy). Następuje zwiększenie aktywności ruchowej w obszarze zachodnich dzielnic (Dębniki, Krowodrza, Ruczaj) oraz samym śródmieściu Krakowa – np. na ulicy Dietla czy wschodnim odcinku II obwodnicy. Potok na moście Dębnickim przekracza ponownie próg 4000 poj./godz. w jego przekroju, a na całym ekranie Wisły wzrost ruchu samochodowego wynosi około 7% (tabela 4). Co ważne, widać że mimo obecności alternatywnego połączenia obwodowego (Trasa ZPŁ), utrzymanie wysokich parametrów ruchowych na ATW sprzyja generacji ruchu wzbudzonego na znacznej długości kordonu II obwodnicy.

Uwzględnienie elastyczności popytu drogowego ma również widoczne (ale ogólnie niższe niż w W1) przełożenie na wyniki analiz dla wariantu W2 (tabela 2) – tj. budowy Trasy ZPŁ wraz ze zmniejszeniem ciągu ATW na odcinku od ronda Grunwaldzkiego do węzła z ulicą Wita Stwosza. Wyniki symulacji wskazują na pojawienie się w skali całego modelu dodatkowych około 600–1000 podróży samochodowych w godzinie szczytu – co oznacza, że w ujęciu sumarycznym zmiany w sieci drogowej skutkują mimo wszystko poprawą warunków podróżowania w skali Krakowa w porównaniu z wariantem bezinwestycyjnym W0, ale na mniejszą skalę niż w W1. Pojawienie się ruchu wzbudzonego oznacza spadek szacowanej prędkości średniej – w skali sieci KMR o 0,5 km/h, a w centralnym obszarze analizy o 0,4 km/h, jednak obydwie wartości wypadają w dalszym ciągu na nieznacznie lepszym poziomie niż w W0. W efekcie skala początkowo szacowanych korzyści w wariantcie W2 (tabela 3) – mierzona redukcją łącznej liczby pojazdów-godzin – jest równie znikoma w skali całego Krakowa (aż o około 97%). Mniejszy jest za to wpływ wzbudzenia ruchu na „erozję” korzyści mierzonych w centralnym obszarze analizy: w wariantcie W2 zyski w łącznym



Rys. 2. Prognozowany efekt sieciowy ruchu wzbudzonego (pojazdy SO) w wariantach W1 (po lewej) oraz w wariantach W2 (po prawej) – przy stopie elastyczności popytu równej 0,8.
Źródło: opr. własne

czasie spędzonym w sieci (poj.-godz.) są niższe tylko o około 14%, a sumaryczna praca przewozowa (poj.-km) utrzymuje się na stabilnym poziomie i jest nadal około 14% niższa niż przed zmianami w sieci drogowej (W0).

Jak pokazuje plansza (rys. 2), w wariantach W2 można również zaobserwować efekt sieciowy w kontekście wzbudzenia ruchu, jednakże przyrosty ruchu są niższe niż w wariantach W1. Natężenie ruchu wzrasta o około 200 poj./godz. w przekroju Trasy ZPE oraz autostrady A4, widoczne są także rozproszone wzrosty potoków ruchu rzędu 50–100 poj./godz. na odcinkach w południowej części miasta (Dębники, Ruczaj, Kurdwanów). Co więcej, wyniki symulacji wskazują na ciekawe i ważne zależności zachodzące w śródmieściu Krakowa: z jednej strony ograniczenie pojemności układu drogowego wskutek zwężenia ATW oznacza, że praktycznie zanika tu zjawisko wzbudzenia ruchu – a jednocześnie brak jest widocznego efektu tłumienia ruchu. Można stąd wnioskować, że układ drogowy w centrum Krakowa już osiągnął wysoki, ale stabilny poziom nasycenia ruchem drogowym, a warunki ruchu osiągnęły stan względnej równowagi – tj. brak jest istotnych zmian w czasach podróży w porównaniu do wariantu W0. Stąd też potoki ruchu w korytarzu zwężonej ATW utrzymują się na dużo niższym poziomie niż w W0 oraz W1, a skala przyrostu natężenia ruchu wzdłuż ATW jest wyraźnie ograniczona i nie przekracza 2200–2300 poj./godz. w przekroju. Przyrost ruchu jest za to widoczny na odcinkach równoległych i oddalonych od obszaru śródmieścia: na moście Dębnickim ruch wzrasta do 3800 poj./godz., a na autostradzie A4 do 3500 poj./godz. Sumaryczny wzrost natężenia ruchu na ekranie Wisły jest niższy niż w wariantach W1 i oscyluje na poziomie ok. 3% w porównaniu z wariantem W0.

Wnioski i podsumowanie

Wyniki analiz symulacyjnych ukazują, w jak istotnej skali uwzględnienie elastyczności popytu drogowego – tj. zmiany liczby podróży w odpowiedzi na zmianę warunków ruchu – może wpłynąć na prognozowane skutki zakładanych scenariuszy rozwoju sieci drogowej w Krakowie oraz ich końcową ocenę efektywności. Przy założeniu niezmiennych więzby podróży (stopa elastyczności równa 0) budowa Trasy ZPE w wariantach W1 skutkowałaby rzeczywiście znaczną poprawą warunków podróżowania – w kontekście czasów i prędkości podróży mierzonych w skali całego miasta. Przy takim założeniu średnia prędkość podróży samochodem w obszarze całego modelu wzrosłaby z 48,3 km/h w wariantach W0 do 50,2 km/h w wariantach W1. Pozytywne zmiany w funkcjonowaniu sieci drogowej byłyby także widoczne w wariantach W2, gdzie pomimo dodatkowego zwężenia ATW chłonność układu drogowego miasta byłaby ogólnie większa w porównaniu do stanu sprzed realizacji projektów drogowych (tj. wariant W0), aczkolwiek skala korzyści byłaby już widocznie niższa niż dla W1: prędkość średnia podróży wzrosłaby już tylko do 49,4 km/h. W obu wariantach Trasa ZPE przejmowałaby znaczne potoki ruchu z przyległych obszarów Krakowa oraz równoległych odcinków IV i II obwodnicy, a w wariantach W2 wyraźnie widoczny byłby efekt „odciążenia” korytarza ATW w śródmieściu Krakowa, gdzie natężenie ruchu spada aż o 50% – 60%.

Powyższe scenariusze nie uwzględniają jednak skali zmian w aktywności ruchowej, z jakimi należy się liczyć przy realizacji tak daleko idących przekształceń w systemie transportowym Krakowa. Obydwa analizowane projekty drogowe w fundamentalny sposób wpłyną na warunki podróżowania samochodem w wielu relacjach podróży na tere-



Rys. 3. Graficzne porównanie wyników symulacji – spodziewane zmiany w potokach ruchu drogowego przy realizacji Trasy ZPŁ (wariant W1 – po lewej) oraz dalszym zwięzieniu ciągu ATW (wariant W2 – po prawej) po uwzględnieniu elastycznej reakcji popytu (pojazdy SO), w odniesieniu do wariantu bezinwestycyjnego W0. Kolor czerwony – wzrost natężenia ruchu, kolor zielony – spadek natężenia ruchu.

Źródło: opr. własne

nie miasta, w których – jak pokazują wyniki symulacji – nastąpi „uwolnienie” dodatkowej liczby podróży samochodowych. Należy tutaj zauważyć, że prezentowane analizy uwzględniają nie tylko przyrost podróży wynikający z przepływu modalnego (tj. przejścia podróży od transportu zbiorowego), którego wpływ jest równoważny z wartością stopy elastyczności popytu na poziomie ok. 0,3–0,4. Dodatkowa generacja ruchu wynikająca m.in. z przesunięcia przestrzennego i czasowego – wynikająca z efektu tzw. *triple-convergence* [11] – oznacza, że już w krótkim horyzoncie czasowym należy liczyć się z jeszcze większą liczbą podróży samochodowych w godzinach szczytu, które w efekcie będą generować dodatkowe koszty podróży w mieście.

W symulacjach ukazano, jak uwzględnienie zjawiska wzbudzenia i tłumienia ruchu drogowego może już w ciągu pierwszych kilku lat wpłynąć na spodziewane zmiany i korzyści w funkcjonowaniu sieci drogowej Krakowa dla analizowanych projektów. Plansza (rys. 3) obrazuje skalę zmian w potokach ruchu drogowego (w godzinie szczytu porannego) przy stopie elastyczności popytu na poziomie 0,8 w wariantach inwestycyjnych W1 i W2, w odniesieniu do potoków ruchu symulowanych przed przekształceniem sieci drogowej (wariant bezinwestycyjny W0). Widać, że w wariantcie W1 efekt odciążenia sieci drogowej będzie tak naprawdę minimalny – korzyści z budowy Trasy ZPŁ zostaną w znacznym stopniu „skonsumowane” przez wzbudzenie ruchu zarówno w korytarzu III obwodnicy, jak i – w formie efektu sieciowego (*ripple-effect*) [20] – także na trasach dojazdowych i alternatywnych. Po uwzględnieniu elastyczności popytu (tj. porównanie scenariuszy $\varepsilon_{ij}^{w,x} = 0,8$ wobec $\varepsilon_{ij}^{w,x} = 0$ w wariantcie W1) skala początkowo szacowanych oszczędności czasowych (suma poj.-godz.) zanika

aż o 98% w skali całego miasta, praca przewozowa (suma poj.-km) wzrasta w śródmieściu Krakowa o 36% – a w samym korytarzu ATW jest ona niższa o zaledwie 4%. W porównaniu z wariantem W0 niewielką redukcję natężenia ruchu drogowego można zaobserwować tak naprawdę tylko wzdłuż autostrady A4, co wynika jednak z założeń symulacji – tj. wzbudzenie ruchu dotyczy tylko podróży wykonywanych samochodem osobowym. Z dużym prawdopodobieństwem można oczekiwać, że zostanie to skompensowane także i dodatkową generacją ruchu ciężarowego i tranzytowego, a także zwiększeniem aktywności ruchowej w podróży docelowo-źródłowych pomiędzy Krakowem i otaczającą aglomeracją, z którą należy się coraz bardziej liczyć w obliczu prognozowanych zmian demograficznych i gospodarczych (nasilenie zjawisk suburbanizacji itd.).

Co ciekawe, także i wariant W2 skutkuje wzbudzeniem dodatkowego ruchu drogowego, jakkolwiek na znacznie mniejszą skalę niż w W1, a przy tym brak jest widocznego efektu tłumienia aktywności ruchowej (rys. 2) – oznacza to, że budowa Trasy ZPŁ przy jednocześnie założonym zwięzieniu ciągu ATW w sumarycznym ujęciu prowadzi mimo wszystko do (niewielkiego) wzrostu chłonności układu drogowego w skali całego miasta. W takim wariantcie parametry funkcjonowania sieci drogowej – pomimo negatywnych zmian w scenariuszach rosnącej elastyczności popytu – są bardziej odporne na skalę „erozji” wynikającą z kosztów dodatkowej generacji ruchu: przykładowo, dużo mniejsza jest skala pogorszenia prędkości, która w W2 wynosi ok. 0,4 km/h dla całego miasta (dla porównania w wariantcie W1 jest to spadek prędkości wynoszący ok. 1,4 km/h) (tab. 2). W porównaniu ze stanem sprzed inwestycji (wariant W0) wyraźnie widać efekt ograniczenia ruchu w śród-

mieście miasta w wyniku zwężenia ATW (rys. 3) – pokazuje to, że stan nasycenia sieci jest wysoki, ale utrzymuje się na stabilnym poziomie i w miarę wzrostu stopnia elastyczności popytu nie występuje już w tym obszarze ani dodatkowe wzbudzenie ruchu, ani też tłumienie (dławienie) obecnej już tutaj aktywności ruchowej. Przyrosty ruchu wzdłuż III obwodnicy w wariantcie W2 w dużo większym stopniu wynikają zatem z przejścia dotychczas realizowanych podróży w mieście niż z pojawienia się nowych podróży. Co prawda skala szacowanych oszczędności czasowych w sieci całego Krakowa zanika w podobnym stopniu (o 97%) jak w wariantcie W1, ale za to mniejszy jest przyrost sumarycznej pracy przewozowej w mieście. Przede wszystkim jednak korzyści osiągane w centralnym obszarze analizy są bardziej trwałe („odporne”) w kontekście potencjalnej reakcji po stronie więzby podróży: praca przewozowa (suma poj.-km) układu drogowego w śródmieściu Krakowa utrzymuje się na bardzo zbliżonym poziomie jak w scenariuszu sztywnej więzby popytu i jest niższa o ok. 13% niż w wariantcie W0, a w korytarzu ATW maleje ona aż o 46%.

Wyniki powyższych analiz mogą zatem dostarczać ważnych przesłanek dla długofalowej strategii kształtowania układu drogowego Krakowa. Może się okazać, że już nawet w stosunkowo krótkim horyzoncie czasowym – wskutek potencjalnej reakcji w zachowaniach podróżnych – poziom oczekiwanej poprawy w skali całego miasta nie będzie się znacząco różnił w obu wariantach, co pokazuje m.in. porównanie średnich prędkości na obszarze całego modelu (49,2 km/h w wariantcie W1 wobec 48,9 km/h w wariantcie W2 – przy stopie elastyczności $\varepsilon_{ij}^{w,x}$ równej 0,8). Można zauważyć, że wyniki uzyskane w wariantcie W1 stanowią odzwierciedlenie paradoksu często obserwowanego we współczesnych miastach, opisanego jako tzw. prawo Lewis’a-Mogridge’a [5], [6]: realizacja zachodniego odcinka III obwodnicy bez dalszej ingerencji w układ drogowy nie przyniesie zakładanego odciążenia II czy IV obwodnicy, gdzie uwolnione rezerwy przepustowości mogą zostać szybko „wypełnione” przez zwiększoną aktywność ruchu samochodowego. Pomimo pewnej poprawy parametrów podróży praktycznie znikomy będzie spadek ruchu samochodowego w centrum Krakowa, a w podróży miejskich wyraźnie wzrośnie rola transportu indywidualnego – tu należy podkreślić, że znaczna część z tych podróży będzie się wiązać ze spadkiem podróży wykonywanych transportem zbiorowym, a także podróży pieszych i rowerowych. W wariantcie W2 za to dalsze zwężenie II obwodnicy nie tylko wyraźnie wpłynie na ograniczenie ruchu samochodowego w korytarzu ATW i przyległej sieci drogowej, ale także w bardzo dużym stopniu ograniczy skalę wzbudzenia ruchu w obszarze śródmieścia Krakowa. W efekcie tego nawet przy prognozowanej reakcji po stronie popytu (tj. zmian aktywności ruchowej) wciąż widoczna będzie poprawa warunków podróży w całej sieci drogowej – a przy tym prędkości i czasy przejazdu w podróży wykonywanych w śródmieściu nie ulegną istotnemu pogorszeniu. Zminimalizuje to także ryzyko przepływu modalnego podróży od transportu zbiorowego oraz aktywnych form transportu (tj. pieszego i rowerowego).

Etapowanie przekształceń układu drogowego Krakowa według wariantu W2, tj. budowa III obwodnicy (Trasy Zwierzynieckiej, Pychowickiej i Łągiewnickiej) oraz w dalszej perspektywie zwężenie II obwodnicy (Alej Trzech Wieszców), wydaje się być zatem wariantem optymalnym – pozwalającym z jednej strony na poprawę dostępności i prędkości (czasów) przejazdu w wielu relacjach podróży na obszarze Krakowa, a z drugiej – na skuteczną redukcję uciążliwości ruchu samochodowego szczególnie w obszarze śródmiejskim. Jest to także rozwiązanie spójne z długofalową strategią kształtowania układu transportowego Krakowa w sposób wydajny i zrównoważony: umożliwi oparcie obsługi transportowej wzdłuż II obwodnicy o bardziej efektywne formy transportu zbiorowego (np. linię tramwajową w zwężonej ATW [21], ruch pieszy i rowerowy), a jednocześnie przeniesienie ciężaru obsługi ruchu drogowego w mieście na (bardziej wydajną pod tym względem) III obwodnicę Krakowa.

Literatura

1. *Transport Drogowy w Polsce w latach 2014 i 2015*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2017.
2. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Passenger_cars_in_the_EU
3. Downs A., *Stuck in traffic: Coping with peak-hour traffic congestion*, Brookings Institution Press, 2000.
4. Thomson J.M., *Great cities and their traffic*, London 1977.
5. Lewis D., *Estimating the influence of public policy on road traffic levels in Greater London*, Journal of Transport Economics and Policy (155–168), 1977.
6. Mogridge M.J.H., *Travel in towns: jam yesterday, jam today and jam tomorrow?*, Springer, 1990.
7. Olszewski P., Suchorzewski W., *Samochód w śródmieściu*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983.
8. Szarata A., *Modelowanie podróży wzbudzonych oraz tłumionych zmianą stanu infrastruktury transportowej*, Politechnika Krakowska, 2013.
9. Szarata A. z zespołem, *Krakowski Model Ruchu*, Politechnika Krakowska, 2014.
10. Litman T., *Generated traffic and induced travel*, Victoria Transport Policy Institute, 2017.
11. Downs A., *Still stuck in traffic: coping with peak-hour travel congestion*, Brookings Institution Press, 2005.
12. Szarata A., *Simulation analysis of suppressed traffic*, Advances in Transportation Studies, An International Journal, Section A&B (35–44), 2013.
13. Goodwin P.B., *Empirical evidence on induced traffic*, Transportation, 23 (1) (35–54), 1996.
14. <http://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/warszawa-jak-wzrosl-ruch-dzieki-mostowi-siekierowskiemu-2148.html>
15. <http://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/52-tysiacekierowcow-znikajac-nie-moze-sie-mylic-48222.html>
16. *Infrastruktura Drogowa, JASPERS: Niebieska Księga: Warszawa/Bruksela 2015.*
17. Coombe D., *Induced traffic: What do transportation models tell us?* Transportation, 23(1) (83–101), 1996.
18. Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego Miasta Krakowa, UM, Kraków 2014.
19. Szarata A., *Modelowanie symulacyjne ruchu wzbudzonego i tłumionego*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2010, nr 3.
20. Gorham R., *Demistifying induced travel demand. Sustainable Urban Transport Technical Document # 1*. Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ). Eschborn 2009.
21. http://krakow.pl/aktualnosci/201137,29,komunikat,aleje_trzech_wieszczo_2_0_mniej_samochodow_wiecej_zieleni.html