

dr inż. Marcin Dębiński^{1*)}

ORCID: 0000-0002-5967-0637

dr inż. Mateusz Szarata²⁾

ORCID: 0000-0003-0227-2811

dr inż. Marcin Wrótny¹⁾

ORCID: 0000-0002-9353-3396

inż. Aleksandra Jaworska³⁾

dr inż. Marek Motylewicz⁴⁾

ORCID: 0000-0002-2702-9829

dr inż. Michał Jukowski¹⁾

ORCID: 0000-0003-3750-8281

Analysis of traffic prediction methods in urban infrastructure

Porównanie metod prognozowania ruchu drogowego w infrastrukturze miejskiej

DOI: 10.15199/33.2025.06.13

Abstract: In road infrastructure projects, it is essential to accurately determine the parameters that the investment should meet. One of the key factors is the traffic volume that the planned road will carry. Traffic forecasts can be conducted using various methods, with accuracy being a crucial aspect. Reliable results can be achieved by utilizing traffic models. However, Polish law does not establish unified requirements for such models. Detailed guidelines are provided in instructions developed by various institutions.

Keywords: traffic forecasts; traffic model; traffic growth rate; gross domestic product (GDP).

Streszczenie: W inwestycjach drogowych niezbędne jest dokładne rozpoznanie parametrów, jakie powinno spełniać przedsięwzięcie. Podstawową informacją jest natężenie ruchu drogowego, jakie będzie przenosić planowana droga. Prognozowanie ruchu można wykonywać różnymi metodami. Istotna jest ich dokładność, którą można uzyskać, stosując modele ruchu drogowego. W polskim prawie nie ma określonych ujednoliconych wymagań dotyczących modeli. Dokładne wymagania opisane są w instrukcjach opracowanych przez różne instytucje.

Słowa kluczowe: prognozowanie ruchu drogowego; model ruchu drogowego; wskaźnik wzrostu ruchu; produkt krajowy brutto (PKB).

Traffic forecasting and modeling play a key role in the planning, design, and maintenance of road infrastructure investments. These processes enable the prediction of traffic changes, the assessment of the impact of infrastructure on the surrounding environment, and the optimization of transportation solutions. The first use of traffic models in Poland was noted in the 1950s. Since then, they have been gradually improved, especially with the development of IT technologies that have enabled increasingly advanced software to support traffic analysis [1].

The importance of traffic models in infrastructure planning is emphasized in the guidelines of the Polish Agency for Enterprise Development (PARP) and the Centre for EU Transport Projects (CUPT). For infrastructure projects funded by these institutions, it is required to conduct economic analyses based on network traffic models. These requirements are included in the *JASPERS Blue Book*, which outlines standards for economic analyses [2]. CUPT has developed a *vademecum for traffic modeling*, detailing key requirements and methodological assumptions [3]. This document is a significant source of guidance for using traffic models in Poland. For both ongoing and planned investments, CUPT has also developed the *National Traffic Model*, which

Prognozowanie oraz modelowanie ruchu drogowego odgrywa kluczową rolę w procesie planowania, projektowania oraz utrzymania inwestycji drogowych. Umożliwia ono przewidywanie zmian w natężeniu ruchu, ocenę wpływu infrastruktury na otoczenie oraz optymalizację rozwiązań komunikacyjnych. Pierwsze zastosowanie modelu ruchu drogowego w Polsce odnotowano w latach pięćdziesiątych XX wieku. Od tego czasu modele były stopniowo udoskonalane, a rozwój technologii informatycznych pozwolił na wprowadzenie coraz bardziej zaawansowanego oprogramowania wspomagającego analizy ruchu [1].

Istotność modeli ruchu w procesie planowania infrastruktury podkreślają wytyczne Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości (PARP) oraz Centrum Unijnych Projektów Transportowych (CUPT). W przypadku projektów infrastrukturalnych finansowanych ze środków tych instytucji wymagane jest przeprowadzenie analiz ekonomicznych opartych na prognozach ruchu pochodzących z sieciowych modeli ruchu drogowego. Wymagania te wynikają z zapisów zawartych w *Niebieskiej Księdze JASPERS*, która określa standardy analiz ekonomicznych [2]. CUPT, w celu ujednolicenia zasad modelowania ruchu, opracowało *Vademecum do Modelowania Ruchu*, w którym zawarto najważniejsze wymagania dotyczące prognozowania ruchu oraz kluczowe założenia metodologiczne [3]. Dokument ten stanowi istotne źródło wytycznych w zakresie stosowania modeli ruchu drogowego w Polsce. Na potrzeby realizowanych oraz planowanych inwestycji CUPT opracowało także *Krajowy Model Ruchu*, który spełnia założenia zawarte w *Vademecum* i umożliwia dokładniejsze prognozowanie na-

¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

²⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii i Architektury

³⁾ Politechnika Lubelska, studentka

⁴⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

^{*)} Correspondence address: m.debinski@pollub.pl

complies with the vademecum's principles and allows for more accurate forecasting. Another essential document is *WR-D-13 – guidelines for conducting traffic analyses and forecasts* [4], which define forecasting requirements depending on the location, purpose, and specific assumptions of the project. The use of these guidelines ensures reliable and realistic analyses that form the basis for decisions on infrastructure development.

The importance of accurate forecasts is confirmed by the Supreme Audit Office report from May 19, 2014 [5]. It states that traffic forecast errors may lead to unjustified investments, including overdimensioning noise mitigation measures. The report highlights that GDP-based forecasts (gross domestic product) often fail to reflect real traffic growth. The impact of road traffic and its conditions on the selection of noise protection measures is the subject of research conducted by numerous scientific centers both in Poland and worldwide. Issues related to inaccurate traffic forecasts can affect all aspects of road infrastructure. Overestimated traffic volumes may lead to the oversizing of engineering solutions, resulting in excessive investment costs and suboptimal resource utilization [6].

On the other hand, underestimating traffic volumes may lead to overloading of infrastructure and traffic disruptions. To improve the quality of traffic forecasting and enable the analysis of the impact of external factors (such as changes in land use or road network reconstruction), the National Traffic Model was developed. This advanced tool allows for the performance of reliable analyses that can support decision-making processes related to the development and modernization of transport infrastructure. The use of modern technologies, including artificial intelligence and big data, creates new opportunities for traffic forecasting, enabling more effective traffic management and improving road safety.

Urban traffic models allow accurate representation of traffic, including individual transport systems. Available software enables modeling of freight, bicycle, and public transit traffic. An example includes the described freight traffic model [7] and the bicycle traffic model for Warsaw [8]. The freight model takes into account trucks, delivery vehicles, and the locations they serve. The bicycle traffic model reflects travel directions and cyclist behavior. The authors of the Warsaw bicycle traffic model point out the challenges related to its proper calibration. This difficulty arises from the lack of accurate data and methods for assessing the travel behavior of residents using bicycles [8]. A properly developed and calibrated example of a bicycle traffic model, based on data from automatic bicycle counting systems, is the model for Salzburg. Like in the case of Warsaw, this model focuses mainly on the city center due to the availability of data [9]. Models can represent both city areas and surrounding zones, e.g., the Kielce Functional Urban Area model [10]. The model of a city or area functions throughout the entire life cycle of the city. It is used at the stages of planning, design, and operation. It plays an important role in road traffic management and can be applied, among other things, to optimize traffic signal settings [11]. The role of the traffic model in urban areas is significant.

teżenia ruchu. Drugim istotnym dokumentem określającym wymagania dotyczące modelowania ruchu drogowego są *WR-D-13 – Wytyczne wykonywania analiz i prognoz ruchu drogowego* [4]. Precyzują one wymagania dotyczące prognozowania ruchu w zależności od lokalizacji, celu oraz założeń projektowych. Ich stosowanie ma na celu zapewnienie rzetelnych i realistycznych analiz, które stanowią podstawę do podejmowania decyzji w zakresie rozwoju infrastruktury transportowej.

Znaczenie precyzyjnych prognoz ruchu potwierdza raport Najwyższej Izby Kontroli z 19 maja 2014 r. [5]. Wskazuje on, że błędy w prognozowaniu ruchu drogowego mogą prowadzić do nieuzasadnionych inwestycji, w tym przewymiarowania środków ochrony przed hałasem. W raporcie podkreślono, że jednym z głównych czynników wpływających na przewymiarowanie ekranów akustycznych były prognozy ruchu oparte na wskaźnikach PKB (Produkt Krajowy Brutto), które nie zawsze odzwierciedlają rzeczywisty wzrost natężenia ruchu. Wpływ ruchu drogowego oraz jego warunków na dobór środków ochrony przed hałasem jest przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych zarówno w Polsce, jak i na świecie. Problemy związane z niedokładnymi prognozami ruchu mogą oddziaływać na wszystkie aspekty infrastruktury drogowej. Zawyżone wartości natężenia ruchu mogą prowadzić do przewymiarowania rozwiązań inżynierskich, co skutkuje nadmiernymi kosztami inwestycji oraz nieoptymalnym wykorzystaniem zasobów [6]. Z kolei niedoszacowanie natężenia ruchu może prowadzić do przeciążenia infrastruktury i utrudnień w ruchu. Aby zwiększyć jakość prognozowania ruchu i umożliwić analizę wpływu czynników zewnętrznych (np. zmiany w zagospodarowaniu przestrzennym lub przebudowy układu drogowego), stworzono Krajowy Model Ruchu. To zaawansowane narzędzie pozwala na wykonywanie wiarygodnych analiz, które mogą wspierać procesy decyzyjne w zakresie rozwoju i modernizacji infrastruktury transportowej. Wykorzystanie nowoczesnych technologii, w tym sztucznej inteligencji oraz big data, stwarza nowe możliwości w zakresie prognozowania ruchu, umożliwiając bardziej efektywne zarządzanie ruchem drogowym oraz poprawę bezpieczeństwa na drogach.

Modele ruchu w obszarach miejskich pozwalają na dokładne jego odwzorowanie z uwzględnieniem poszczególnych systemów transportowych. Wykorzystując istniejące oprogramowanie, można modelować ruch towarowy, rowerowy oraz pojazdów komunikacji miejskiej. Przykładem jest opisany model ruchu towarowego [7] oraz model ruchu rowerowego Warszawy [8]. Model towarowy uwzględnia pojazdy ciężarowe i dostawcze oraz miejsca, które je obsługują. Model ruchu rowerowego odwzorowuje kierunki podróży oraz zachowania rowerzystów. Autorzy modelu ruchu rowerowego Warszawy wskazują na trudności związane z odpowiednią jego kalibracją. Jest to trudne ze względu na brak dokładnych danych i metod oceny zachowań komunikacyjnych mieszkańców na rowerach [8]. Przykładem poprawnie wykonanego i skalibrowanego modelu ruchu rowerowego za pomocą pomiarów z automatycznych systemów zliczających rowerzystów może być Salzburg. Model ten tak jak w przypadku Warszawy skupia się głównie na centrum miasta, co jest spowodowane dostępnością danych [9]. Modele mogą odwzorowywać nie tylko same obszary miast, ale również

Research Method

This paper presents the results of analyses conducted for a three-way intersection located in a large city. The aim of the study was to compare traffic forecasts prepared using two different methods: GDP growth indicators and the four-stage traffic model, both of which are applied in traffic volume forecasting. According to recommended guidelines, traffic modeling constitutes the primary method, while simplified approaches – such as the use of GDP growth indicators or extrapolation of historical data – should be applied only in specific cases. In the conducted analysis, the extrapolation method was not considered due to the lack of access to historical traffic data. Therefore, **the traffic forecast was prepared using only the two methods** mentioned above:

- **GDP-based indicators** – traffic forecasting is based on calculations using elasticity coefficients and annual GDP traffic growth rates. This method is relatively simple to implement and is commonly used in analyses of interurban roads. Its time horizon covers forecasts up to the year 2050, after which it is recommended to adopt values corresponding to the growth rates projected for 2050 [12].

- **Four-stage traffic simulation model** – this method takes into account more detailed traffic data, such as trip generation and distribution, mode choice, and route assignment. As a result, it enables a more accurate representation of actual traffic conditions and the impact of infrastructure changes on traffic volume.

The **GDP indicator method** is mainly applied to interurban roads, whereas in urban areas it may lead to significant errors. The use of this method can be justified when forecasting traffic on existing road sections, in the vicinity of which the surrounding road network is not expected to undergo major changes within the assumed time horizon. For new road sections or intersections, it is impossible to accurately predict the directional distribution and potential traffic load. Furthermore, historical observations show that GDP indicators are unable to foresee sudden changes in traffic volumes caused by external factors (e.g., economic crises, shifts in transport structure, or unpredictable random events).

The second method of traffic forecasting involves the use of **traffic models**, which enable a more precise representation of transport phenomena. According to the *WR-D-13* guidelines, a macroscopic traffic model is a computer-based simulation system that uses mathematical functions to reflect the processes occurring within a transport system on a macro scale, encompassing areas such as a country, region, province, or city. These models take into account numerous factors, including demographic data, land use, and travel behavior characteristics, allowing for a more accurate determination of traffic distribution within the road network of the studied area [4]. One of the most commonly used tools in traffic modeling is the four-stage model, which consists of the following stages [3]:

- 1) **traffic generation** – determining travel origins and destinations depending on the demographic and spatial characteristics of the region.

- 2) **traffic distribution** – analysis and prediction of how trips are distributed among various zones;

tereny przyległe, np. model Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego [10]. Model miasta lub obszaru funkcjonuje w całym cyklu życia miasta. Wykorzystywany jest na etapie planowania, projektowania i eksploatacji. Pełni ważną rolę w zarządzaniu ruchem drogowym. Może być wykorzystywany m.in. do optymalizowania ustawienia sygnalizacji świetlnej [11]. Rola modelu ruchu drogowego w miastach jest istotna.

Metoda badań

W artykule przedstawiono wyniki analiz skrzyżowania trójwłotowego zlokalizowanego w dużym mieście. Celem badań było porównanie prognoz ruchu wykonanych dwiema różnymi metodami: wskaźników PKB oraz czterostadiowym modelem ruchu, które mają zastosowanie w prognozowaniu natężenia ruchu. Zgodnie z rekomendowanymi wytycznymi podstawową metodą jest modelowanie ruchu, natomiast metody uproszczone, takie jak wykorzystanie wskaźników wzrostu PKB czy ekstrapolacja danych historycznych, powinny być stosowane jedynie w określonych przypadkach. W przeprowadzonej analizie nie została uwzględniona metoda ekstrapolacji ze względu na brak dostępu do archiwalnych danych dotyczących ruchu drogowego. W związku z tym **prognoza ruchu została wykonana wyłącznie przy użyciu dwóch metod**:

- **wskaźników PKB** – prognozowanie ruchu bazuje na obliczeniach wykorzystujących wskaźniki elastyczności oraz wskaźniki rocznego wzrostu ruchu PKB. Jest stosunkowo prosta w implementacji i powszechnie wykorzystywana w analizach dotyczących dróg zamiejskich. Jej zakres czasowy obejmuje prognozy do 2050 r., przy czym po tym okresie zaleca się przyjmowanie wartości odpowiadających wskaźnikom wzrostu dla 2050 r. [12].

- **czterostadiowego symulacyjnego modelu ruchu** – metoda uwzględnia bardziej szczegółowe dane dotyczące ruchu drogowego, takie jak generowanie i dystrybucja ruchu, wybór środków transportu oraz tras przejazdu. Dzięki temu pozwala na bardziej precyzyjne odwzorowanie rzeczywistych warunków ruchowych i wpływu zmian infrastrukturalnych na natężenie ruchu.

Metoda wskaźników PKB stosowana jest głównie w przypadku dróg zamiejskich, natomiast w obszarach miejskich może prowadzić do znacznych błędów. Zastosowanie metody może znaleźć uzasadnienie w przypadku realizacji prognoz ruchu na odcinkach dróg istniejących, w otoczeniu których w przyjętym horyzoncie czasowym sąsiadująca sieć drogowa nie ulegnie istotnym zmianom. W przypadku nowych odcinków ulic lub skrzyżowań nie można poprawnie przewidzieć struktury kierunkowej oraz możliwego obciążenia ruchem. Ponadto historyczne obserwacje wskazują, że wskaźniki PKB nie są w stanie przewidzieć nagłych zmian w natężeniu ruchu, takich jak okresowy spadek natężenia ruchu drogowego spowodowany czynnikami zewnętrznymi (np. kryzysem gospodarczym, zmianami w strukturze transportu czy nieprzewidywalnymi zdarzeniami losowymi).

Drugą metodą prognozowania ruchu jest **wykorzystanie modeli ruchu drogowego**, które pozwalają na bardziej precyzyjne odwzorowanie zjawisk transportowych. Zgodnie z wytycznymi *WR-D-13*, makroskopowy model ruchu drogowego to komputerowy system symulacyjny, który z wykorzystaniem funkcji

3) **modal split** – determination of the share of individual modes of transport in overall traffic, e.g., passenger cars, public transport;

4) **traffic assignment** – identifying the routes taken by users, considering road availability and capacity.

According to the JASPERS Blue Book guidelines, the process of building and updating a traffic model should proceed in five main stages [2]:

1) **Model Definition** – determining the model scope, road network details, division into traffic zones, vehicle categories, transport modes, users, and other relevant parameters

2) **Base Year Model Creation** – developing the basic model including current traffic conditions and a travel matrix representing transport flows.

3) **Model Calibration** – adjusting model parameters to actual conditions based on available measurements such as traffic volumes and transport surveys.

4) **Traffic Forecasting** – making assumptions regarding future traffic volumes, growth rates, their impact on transport demand, and considering additional factors affecting the transport system.

5) **Result Analysis & Reporting** – estimating traffic flows, interpreting the results, and preparing a descriptive report with recommendations and conclusions.

To ensure high model quality and proper calibration, the collection of various data is necessary, including:

- Road network information – determination of road, street, railway, and tram line layouts along with their geometric parameters;

- Traffic volume data at network points – execution and analysis of traffic measurements at selected points for model calibration;

- Public transport connection networks with timetables – gathering data on the routes and schedules of buses, trolleybuses, trams, and trains;

- Passenger flow data – performing measurements of passenger flows in public transport vehicles to analyze their utilization;

- Comprehensive Traffic Surveys (CTS) – studying residents' transport habits to accurately represent supply and demand;

- Land use information – data from local spatial development plans necessary to identify potential traffic generators and their characteristics;

- Demographic data – information indicating potential traffic volume growth or decline in specific areas;

- Other data on road users and the analyzed area – information on distinctive locations that may influence traffic volumes and conditions.

Collecting this data is time-consuming and costly but essential for obtaining precise results. Increasingly, data provided by mobile network operators is also used, enhancing model calibration accuracy by tracking actual user movement patterns in real time. The use of advanced traffic models allows for more accurate forecasting of future traffic changes, better transport infrastructure management, and more informed investment decisions.

matematycznych odwzorowuje procesy zachodzące w systemie transportowym w skali makro, obejmującej obszary takie jak kraj, region, województwo czy miasto. Modele te uwzględniają wiele czynników, w tym dane demograficzne, zagospodarowanie przestrzenne oraz charakterystyki podróży użytkowników, co pozwala na dokładniejsze określenie rozkładu ruchu w sieci drogowej badanego obszaru [4]. Jednym z najczęściej stosowanych narzędzi w modelowaniu ruchu jest czterostadiowy model, który składa się z następujących etapów [3]:

1) generowanie ruchu – określenie źródeł i celów podróży w zależności od charakterystyki demograficznej i przestrzennej regionu;

2) rozkład przestrzenny ruchu – analiza i przewidywanie, jak podróże rozkładają się pomiędzy różnymi rejonami;

3) podział zadań przewozowych – ustalenie, jaki udział w ruchu mają poszczególne środki transportu, np. samochody osobowe, transport publiczny;

4) rozkład ruchu na sieci – określenie tras, którymi poruszają się użytkownicy, uwzględniając dostępność dróg i ich przepustowość.

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w *Niebieskiej Księdze JASPERS*, proces budowy i aktualizacji modelu ruchu powinien przebiegać w pięciu głównych etapach [2]:

1) **definiowanie modelu** – określenie zakresu modelu, szczegółowości sieci drogowej, podziału na rejony komunikacyjne, kategorii pojazdów, rodzajów transportu oraz użytkowników, a także innych istotnych parametrów;

2) **tworzenie modelu roku bazowego** – opracowanie podstawowego modelu obejmującego aktualne warunki ruchowe oraz macierz podróży, która przedstawia przepływy transportowe;

3) **kalibracja modelu** – dostosowanie parametrów modelu do rzeczywistych warunków na podstawie dostępnych danych pomiarowych, takich jak natężenie ruchu i dane z badań transportowych;

4) **prognozowanie ruchu** – opracowanie założeń dotyczących przyszłego ruchu drogowego, w tym wskaźników wzrostu i ich wpływu na popyt transportowy oraz uwzględnienie dodatkowych czynników oddziałujących na system transportowy;

5) **analiza wyników i raportowanie** – oszacowanie potoków ruchu, interpretacja wyników oraz sporządzenie raportu opisowego zawierającego rekomendacje i wnioski.

W celu zapewnienia bardzo dobrej jakości modelu oraz jego poprawnej kalibracji, konieczne jest pozyskanie wielu danych, w tym:

- informacji o sieci drogowej – określenie przebiegu dróg, ulic, linii kolejowych i tramwajowych wraz z ich parametrami geometrycznymi;

- danych o natężeniu ruchu w poszczególnych punktach sieci – wykonanie i analiza pomiarów ruchu drogowego w wybranych punktach w celu uzyskania danych do kalibracji modelu;

- siatki połączeń komunikacji zbiorowej wraz z rozkładem jazdy – pozyskanie danych dotyczących przebiegów tras autobusowych, trolejbusowych, tramwajowych i kolejowych oraz ich rozkładów jazdy;

- danych o potokach pasażerskich – wykonanie pomiarów potoków pasażerskich w pojazdach komunikacji zbiorowej w celu analizy wykorzystania tych środków;

Analysis and Results

The analysis focused on a three-way intersection adjacent to a public exit leading to an industrial facility. Traffic volume measurements were conducted in 2023, followed by traffic forecasts for 2025. A two-year time horizon was assumed for the forecast. Traffic prediction was performed using two methods:

- Based on Gross Domestic Product (GDP) growth indicators,
- Using a traffic model.

Forecasts from both methods showed high agreement in traffic distribution across legs. Differences did not exceed 6%; excluding the industrial leg, they dropped to 2%. Comparing forecasts with actual 2024 data showed only small differences. The results of the calculations are shown in Figure 1.

During peak hours, the highest load at the intersection occurred at approach D, accounting for 51% of the total traffic volume, while the lowest load was recorded at the approach leading to the production facility, as it exclusively serves traffic related to the plant's operation. The next stage involved a traffic forecast using a traffic model. When mapping the road network, the approach from the industrial facility was omitted due to its marginal impact on the overall urban traffic organization. The forecast was prepared for 2025, with particular attention to the afternoon peak period. The results of the calculations are shown in Figure 2.

The analysis of the obtained results indicates that approach D experiences the highest traffic load, accounting for 57% of the total traffic volume at the intersection (Figure 3). For the approach leading to the industrial facility, no traffic volume data is available, which may be due to its marginal impact on the overall traffic organization in the area. The lowest traffic volume was recorded on approach A, contributing only 15% of

• wyników Kompleksowych Badań Ruchu (KBR) – badanie zwyczajów transportowych mieszkańców w celu dokładnego zobrazowania podaży i popytu;

• informacji o zagospodarowaniu przestrzennym – dane z miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego niezbędne do określenia potencjalnych generatorów ruchu i ich charakterystyki;

• danych demograficznych – informacje wskazujące na potencjalny wzrost lub spadek natężenia ruchu drogowego w poszczególnych rejonach;

• innych danych dotyczących użytkowników ruchu oraz analizowanego obszaru – dane o charakterystycznych miejscach, które mogą wpływać na natężenie i warunki ruchu drogowego. Gromadzenie tych danych jest procesem czasochłonnym i kosztownym, ale niezbędnym do uzyskania precyzyjnych wyników. Coraz częściej wykorzystuje się również dane udostępniane przez operatorów telefonii komórkowej, które pozwalają na zwiększenie dokładności kalibracji modeli ruchu, dzięki możliwości śledzenia rzeczywistych wzorców przemieszczania się użytkowników w czasie rzeczywistym. Zastosowanie zaawansowanych modeli ruchu pozwala na dokładniejsze prognozowanie przyszłych zmian w natężeniu ruchu oraz lepsze zarządzanie infrastrukturą transportową i podejmowanie bardziej świadomych decyzji inwestycyjnych.

Badanie i analiza wyników

Do analizy wybrano trójwlotowe skrzyżowanie, do którego przylega zjazd publiczny prowadzący do obiektu przemysłowego. Badania natężenia ruchu przeprowadzono w 2023 r., a następnie opracowano prognozę ruchu drogowego na 2025 r. W analizie przyjęto horyzont czasowy prognozy wynoszący dwa lata. Predykcję natężenia ruchu wykonano dwiema metodami:

- na podstawie wskaźników wzrostu produktu krajowego brutto (PKB),
- za pomocą modelu ruchu drogowego.

W 2024 r. przeprowadzono kolejne badania ruchu w celu weryfikacji i kalibracji prognoz. Jako pierwszą zastosowano metodę opartą na wskaźnikach wzrostu PKB. Na podstawie zebranych danych określono godziny szczytu popołudniowego oraz wykonano prognozę ruchu w tym okresie. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 1.

W godzinach szczytu największe obciążenie na skrzyżowaniu występuje na wlocie D, który odpowiada za 51% całkowitego natężenia ruchu, a najmniejsze na wlocie prowadzącym do zakładu produkcyjnego, co wynika z faktu, że obsługuje on wyłącznie ruch związany z funkcjonowaniem obiektu. Kolejnym etapem analizy było przeprowadzenie prognozy ruchu z wykorzystaniem modelu ruchu drogowego. W trakcie odwzorowania sieci drogowej pominięto wlot od strony obiektu przemysłowego, ponieważ jego wpływ na ogólną organizację ruchu w mieście jest marginalny. Prognoza została wykonana na 2025 r., ze szczególnym uwzględnieniem godzin szczytu popołudniowego. Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rysunku 2.

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że wlot D charakteryzuje się największym obciążeniem, osiągając 57% całko-

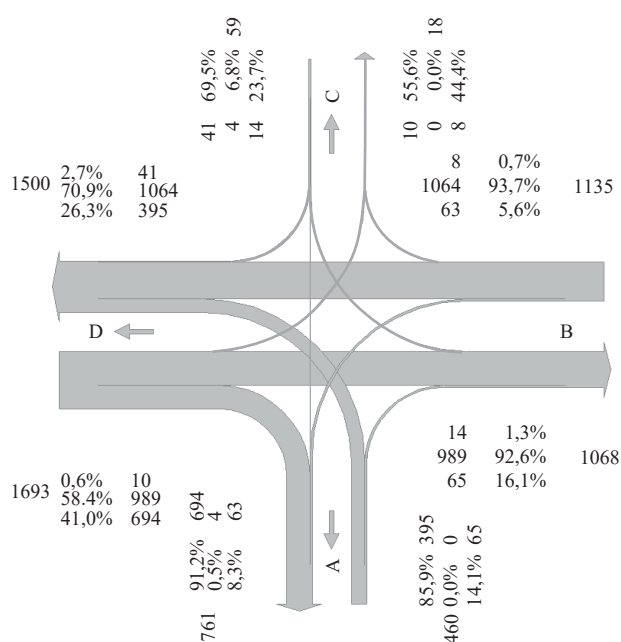


Fig. 1. Projected traffic volumes at the intersection in 2025 – using the GDP index method

Rys. 1. Prognozowane natężenie ruchu drogowego na skrzyżowaniu w 2025 r. wg metody wskaźników PKB



Fig. 2. Projected traffic flows at the intersection in 2025 according to the traffic modelling method

Rys. 2. Prognozowane natężenie ruchu drogowego na skrzyżowaniu w 2025 r. wg metody modelowania ruchu

the total intersection load. For a comprehensive analysis, the traffic load results for each intersection approach were compared using two different traffic forecasting methods.

For a comprehensive analysis, the traffic load results at each intersection approach obtained using both forecasting methods were compared. The analysis revealed significant differences between the two applied methods. The highest traffic volumes were obtained using the GDP growth indicator method. The total difference in the forecast number of vehicles at the entire intersection during the afternoon peak reached 781 vehicles per hour (veh/h), which may significantly affect planned road infrastructure and traffic organization. The greatest discrepancy between the methods was observed at approach B, where traffic volume values differed considerably. To better assess the applied computational methods, a detailed analysis of the traffic distribution among the intersection approaches was conducted, determining how traffic is distributed depending on the forecasting method used. The results of this analysis are shown in Figure 4.

The analysis of traffic load at individual intersection approaches, based on the results of two different forecasting methods, showed high consistency. Differences in traffic volume at particular approaches did not exceed 6%, indicating the consistency of both approaches in predicting traffic distribution at the intersection. When excluding approach C, which was not included in the road network model due to its marginal impact, the difference between the forecasts decreased to 2%. A comparison of traffic forecasts obtained using both methods with actual measurements conducted in 2024 showed relatively small discrepancies. This means that both the GDP growth indicator method and the traffic model provide reliable estimates

witego natężenia ruchu na skrzyżowaniu (rysunek 3). W przypadku wlotu prowadzącego do zakładu przemysłowego brak jest dostępnych danych dotyczących natężenia ruchu, co może wynikać z jego marginalnego wpływu na ogólną organizację ruchu w tym obszarze. Najmniejsze natężenie odnotowano na wlocie A, który odpowiada jedynie za 15% całkowitego obciążenia skrzyżowania. W celu kompleksowej analizy porównano wyniki obciążenia ruchem poszczególnych wlotów skrzyżowania uzyskanych dwiema metodami prognozowania ruchu.

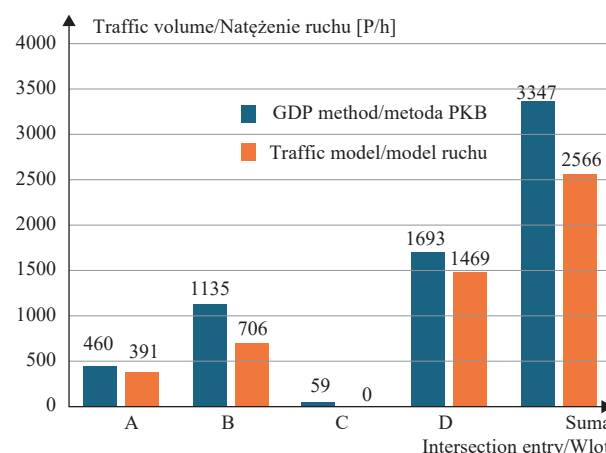


Fig. 3. Comparison of the results of traffic forecasts at the inlets and over the whole intersections according to different methods

Rys. 3. Porównanie wyników prognozowania ruchu na wlotach i na całym skrzyżowaniu wg różnych metod

Analiza wyników prognozowania ruchu drogowego wykazała istotne różnice pomiędzy dwiema zastosowanymi metodami. Największe wartości natężeń ruchu uzyskano przy wykorzystaniu metody bazującej na wskaźnikach wzrostu produktu krajowego brutto (PKB). Łączna różnica w prognozowanej liczbie pojazdów na całym skrzyżowaniu w godzinach szczytu popołudniowego wyniosła 781 pojazdów na godzinę (P/h), co może mieć istotny wpływ na planowaną infrastrukturę drogową oraz organizację ruchu. Największą rozbieżność pomiędzy metodami zaobserwowano na wlocie B, gdzie wartości natężenia ruchu znacznie się różniły. W celu dokładniejszej oceny zastosowanych metod obliczeniowych przeprowadzono szczegółową analizę wielkości udziału ruchu na poszczególnych wlotach skrzyżowania, co pozwoliło określić, w jaki sposób ruch rozkłada się na skrzyżowaniu w zależności od zastosowanej metody prognozowania. Uzyskane wyniki tej analizy przedstawiono na rysunku 4.

Analiza obciążenia poszczególnych wlotów skrzyżowania, uzyskana na podstawie wyników dwóch różnych metod prognozy ruchu, wykazała dużą zgodność wyników. Różnice w natężeniu ruchu pomiędzy poszczególnymi wlotami nie przekraczają 6%, co świadczy o spójności obu podejść w zakresie przewidywania rozkładu ruchu na skrzyżowaniu. W przypadku pominięcia wlotu C, który nie został uwzględniony w modelu sieci drogowej ze względu na jego marginalny wpływ, różnica pomiędzy prognozami zmniejsza się do 2%. Porównanie wyników prognozowania ruchu drogowego, uzyskanych z zastosowaniem obu metod, z rzeczywi-

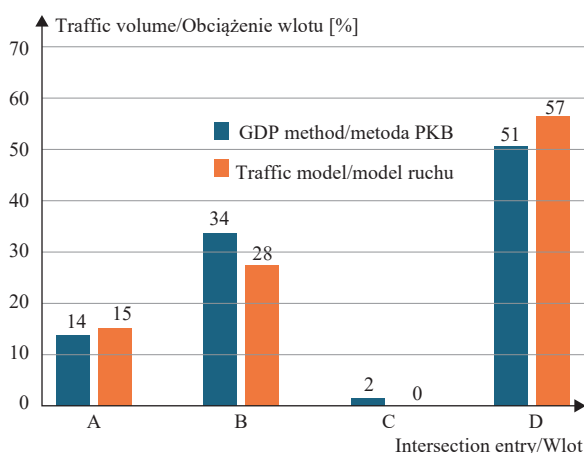


Fig. 4. Comparison of the results of traffic forecasts at intersection inlets according to different methods

Rys. 4. Porównanie wyników prognozowania ruchu na wlotach skrzyżowania wg różnych metod

of traffic distribution at the analyzed intersection. The greatest discrepancy in the GDP-based forecast occurred at approach B, where the deviation exceeded 3% compared to actual traffic measurements. In contrast, the traffic model method showed the largest difference at approach D, exceeding 4%. For approach C, the difference between forecasted and actual approach loads was the smallest, not exceeding 2%, indicating high consistency of both methods with measurement data for this approach. This suggests that regardless of the method used, the predicted proportions of traffic volumes at individual approaches are similar. This indicates consistency in directional traffic distribution using both forecasting approaches. However, the greatest discrepancies concern total traffic volume values. The results obtained using the GDP growth indicator method are noticeably higher than those forecasted using the traffic model. This suggests that the GDP method may lead to more conservative estimates, predicting higher traffic volumes, which may impact planned road infrastructure and traffic organization.

Conclusions

The proper selection of a traffic modeling method is a key element in the process of assessing the impact of planned infrastructure investments. Properly conducted analyses allow for predicting changes in traffic volumes, identifying potential transport problems, and assessing the effects of implemented solutions. Past experience shows that inaccurate traffic forecasts can lead to inefficient allocation of financial resources, deterioration of transport conditions, or failure to achieve intended transport objectives. Currently, legal regulations do not specify clear requirements regarding the use of traffic models, which may result in different approaches to their application in the planning and assessment of investments. Nevertheless, guidelines for macroscopic traffic models are included in documents such as the *JASPERS Blue Book*, *Traffic Modeling Vademecum*, and *WR-D-13*, which are important sources of knowledge for specialists engaged in traffic analysis and forecasting.

stymi pomiarami przeprowadzonymi w 2024 r. wykazało stonkowo niewielkie różnice. Oznacza to, że zarówno metoda bazująca na wskaźnikach wzrostu PKB, jak i model ruchu drogowego zapewniają wiarygodne oszacowania rozkładu ruchu na analizowanym skrzyżowaniu. Największa rozbieżność w przypadku prognozy opartej na wskaźnikach wzrostu PKB wystąpiła na wlocie B, gdzie odchylenie wyniosło ponad 3% w porównaniu z rzeczywistymi pomiarami ruchu. Z kolei metoda oparta na modelu ruchu drogowego wykazała największą różnicę na wlocie D, przekraczającą 4%. W przypadku wlotu C różnica pomiędzy prognozowanymi a rzeczywistymi wartościami obciążenia wlotów była najmniejsza i nie przekroczyła 2%, co wskazuje na dużą zgodność obu metod z danymi pomiarowymi w przypadku tego wlotu. Oznacza to, że niezależnie od zastosowanej metody, przewidywane proporcje natężenia ruchu na poszczególnych wlotach są zbliżone. Wskazuje to na zgodność kierunkowego rozkładu ruchu w przypadku obu podejść prognostycznych. Największe rozbieżności dotyczą jednak wartości natężenia ruchu drogowego. Wyniki uzyskane na podstawie metody wskaźników wzrostu produktu krajowego brutto (PKB) są wyraźnie większe niż wartości prognozowane przy użyciu modelu ruchu drogowego. Sugeruje to, że metoda PKB może prowadzić do bardziej konserwatywnych szacunków, przewidując większe natężenie ruchu, co może mieć wpływ na planowaną infrastrukturę drogową oraz organizację ruchu.

Wnioski

Odpowiedni dobór metody modelowania ruchu drogowego stanowi kluczowy element w procesie oceny wpływu planowanych inwestycji infrastrukturalnych. Właściwie przeprowadzone analizy pozwalają przewidzieć zmiany w natężeniu ruchu, zidentyfikować potencjalne problemy komunikacyjne oraz ocenić skutki wdrażanych rozwiązań. Dotychczasowe doświadczenia pokazują, że błędne prognozy ruchu mogą prowadzić do nieefektywnej alokacji środków finansowych, pogorszenia warunków komunikacyjnych czy braku realizacji zamierzonych celów transportowych. Obecnie w przepisach prawnych nie określono jednoznacznych wymagań dotyczących stosowania modeli ruchu drogowego, co może prowadzić do różnic w podejściu do ich wykorzystywania w procesie planowania i oceny inwestycji. Mimo to, wytyczne w zakresie makroskopowych modeli ruchu drogowego znajdują się w dokumentach takich jak *Błękitna Księga JASPERS*, *Vademecum do Modelowania Ruchu* oraz *WR-D-13*, które stanowią istotne źródło wiedzy dla specjalistów zajmujących się analizą i prognozowaniem ruchu drogowego. Wytyczne rekomendowane wskazują dwie metody prognozy – podstawową (model ruchu) i uproszczoną (metoda wskaźników PKB, metoda ekstrapolacji). Analiza wyników wykazała, że metoda wskaźników PKB ma istotne ograniczenia, które mogą wpływać na dokładność prognoz. Jednym z istotnych aspektów modelowania ruchu jest możliwość pozyskiwania środków zewnętrznych na realizację projektów infrastrukturalnych. Brak odpowiedniego modelu ruchu może skutkować wykluczeniem z możliwości ubiegania się o dofinansowanie,

The recommended guidelines suggest two forecasting methods – basic (traffic model) and simplified (GDP indicator method, extrapolation method). The analysis results showed that the GDP indicator method has significant limitations that may affect forecast accuracy. One important aspect of traffic modeling is the possibility of obtaining external funding for infrastructure projects. The lack of an appropriate traffic model may result in exclusion from the opportunity to apply for funding, which in turn may hinder the implementation of planned investments and slow the development of transport infrastructure. Institutions assessing applications for infrastructure project funding require precise economic and environmental analyses based on reliable traffic forecast results. Forecasts made using methods other than traffic models may be deemed unreliable. The results of the conducted analyses confirm that using traffic modeling as the primary method allows for obtaining more reliable forecasts, especially in urban areas where traffic is more variable and depends on many socio-economic and infrastructural factors. The future of traffic modeling is linked to the dynamic development of modern technologies that enable more accurate forecasting and more effective traffic management. The use of advanced analytical tools, artificial intelligence, and decision support systems allows for more precise investment planning, increased transport efficiency, and improved road safety. As a result, it is possible to better adapt infrastructure to users' real needs and minimize the negative impact on the environment and society.

The research leading to these results has received funding from the commissioned task entitled „VIA CARPATIA Universities of Technology Network named after the President of the Republic of Poland Lech Kaczyński” under the special purpose grant from the Minister of Education and Science, contract no. MEiN/2022/DPI/2578, as part of the action „In the neighborhood-inter-university research internships and study visits.”

Received: 08.01.2025
Revised: 10.02.2025
Published: 24.06.2025

co w konsekwencji może utrudnić realizację planowanych inwestycji i spowolnić rozwój infrastruktury transportowej. Instytucje oceniające wnioski o finansowanie projektów infrastrukturalnych wymagają dokładnych analiz ekonomicznych i środowiskowych opartych na miarodajnych wynikach prognozy ruchu. Prognozy wykonane innymi metodami niż model ruchu mogą być uznane za niewiarygodne. Wyniki przeprowadzonych analiz potwierdzają, że stosowanie modelowania ruchu jako metody podstawowej pozwala na uzyskanie bardziej wiarygodnych prognoz, szczególnie w przypadku obszarów miejskich, gdzie ruch drogowy charakteryzuje się większą zmiennością i zależy od wielu czynników społeczno-ekonomicznych oraz infrastrukturalnych. Przyszłość modelowania ruchu drogowego wiąże się z dynamicznym rozwojem nowoczesnych technologii, które pozwalają na dokładniejsze prognozowanie i bardziej efektywne zarządzanie ruchem. Wykorzystanie zaawansowanych narzędzi analitycznych, sztucznej inteligencji oraz systemów wspomagających decyzje umożliwia bardziej precyzyjne planowanie inwestycji, zwiększenie efektywności transportu oraz poprawę bezpieczeństwa na drogach. W efekcie możliwe jest skuteczniejsze dostosowanie infrastruktury do rzeczywistych potrzeb użytkowników oraz minimalizacja negatywnego wpływu na środowisko i społeczeństwo.

Badania przeprowadzono w ramach zadania zleconego pn. „Politechniczna Sieć VIA CARPATIA im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego” finansowanego z dotacji celowej Ministra Nauki nr umowy MEiN/2022/DPI/2578 działanie „PO SĄSIEDZKU – międzyuczelniane staże badawcze i wizyty studyjne.

Artykuł wpłynął do redakcji: 08.01.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 10.02.2025 r.
Opublikowano: 24.06.2025 r.

Literature

- [1] Suchorzewski W, Brzeziński A, Waltz A. Modelowanie i prognozowanie ruchu od liczydła do Big Data, *Transport Miejski i Regionalny* 2020;12: 6–11
- [2] Niebieska Księga Blue Book Infrastruktura drogowa Jaspers 2023
- [3] Wierchołowski M, Jastrzębski W, Kaczor T. Vademecum do modelowania ruchu CUPT Warszawa 2017
- [4] WR-D-13 Wytyczne wykonywania analiz i prognoz ruchu drogowego
- [5] Zasadność budowy ekranów akustycznych i przepustów (przejść dla zwierząt) na autostradzie A2 i innych wybranych odcinkach dróg, Raport NIK, LLO-4101-06/2013 Nr ewid. 42/2014/P13159/LLO
- [6] Dębiński M, Bohatkiewicz J, Motylewicz M. Wpływ warunków ruchu drogowego na prognozy hałasu, *Materiały Budowlane* 2018; 11:66–67
- [7] Wasiak M, Jacyna M, Kłodawski M, Gołębiowski P. Model ruchu towarowego dla aglomeracji warszawskiej według Warszawskiego Badania Ruchu 2015, *Transport Miejski i Regionalny* 2016;12:29–35
- [8] Jacyna M, Wasiak M, Gołębiowski P. Model ruchu rowerowego dla Warszawy według Warszawskiego Badania Ruchu 2015, *Transport Miejski i Regionalny* 2016;10:5–11
- [9] Wallentin G, Loidl M. Agent-based Bicycle Traffic Model for Salzburg City, *GI_Forum* 2015;3:558–566
- [10] Pyzik M, Drabicki A, Bauer M, Szarata A. Makrosymulacyjny model transportowy miasta Kielce oraz Kieleckiego Obszaru Funkcjonalnego, *Transport Miejski i Regionalny* 2018;03:18–26
- [11] Brockfeld E, Barlovic R, Schadschneider A, Schreckenberg M. Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic, *Physical Review E* 64
- [12] <https://www.gov.pl/web/gddkia/zalozenia-do-prognoz-ruchu>