

MACIEJ KRUSZYNA<sup>1)</sup>GABRIEL SUCHY<sup>2)</sup>

## A PROPOSAL FOR METHOD TO ASSESS ALTERNATIVES OF PROPOSED ROAD INVESTMENT IN A PLANNING PHASE

## PROPOZYCJA METODY OCENY WARIANTÓW PRZEBIEGU INWESTYCJI DROGOWEJ W FAZIE PLANISTYCZNEJ

**STRESZCZENIE.** W artykule poruszono problematykę efektywnej oceny wariantów przebiegu trasy planowanej inwestycji drogowej w fazie planistycznej. Zaprezentowano uproszczoną metodę, która byłaby w ocenie autorów miarodajna, a jednocześnie na tyle prosta i mało pracochłonna, by można ją było stosować w najwcześniejszych stadiach projektowych. W ramach proponowanej metody ocenie podlega użyteczność drogi, bezpieczeństwo ruchu oraz jej wpływ na środowisko. Za miarę użyteczności projektowanej trasy przyjęto odciążenie istniejącej sieci drogowej oraz skrócenie czasu podróży w porównaniu z wariantem bezinwestycyjnym. W ocenie bezpieczeństwa ruchu uwzględniono wpływ układu geometrycznego trasy oraz rozmieszczenia węzłów (w przypadku dróg ekspresowych i autostrad) na prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń drogowych. Oddziaływanie inwestycji na środowisko rozpatrzono pod względem zmiany w emisji spalin oraz wycinki lasów i fragmentacji siedlisk. Ocenę przeprowadzono metodą punktową. Wymienione kryteria połączono w ocenę finalnej za pomocą funkcji celu, uwzględniającej efektywność przebiegu trasy oraz szacunkowy koszt inwestycji. Metodę omówiono na przykładzie różnych wariantów dodatkowego połączenia drogi ekspresowej S3 oraz autostrady A4 w ciągu korytarza Wrocław-Bolków.

**SŁOWA KLUCZOWE:** analiza efektywności inwestycji, ocena wielokryterialna, planowanie, wybór wariantu.

**ABSTRACT.** The subject matter of this research paper is an efficient assessment of the routing options of planned road investments in the planning phase. A simplified method is presented which, in the authors' opinion, combines reliability with relative simplicity and with a small input of labour needed, which factors make it suitable for use in very early stages of the process of engineering. The proposed method assesses the usefulness of the road, safety of traffic and its environmental impact. The measure of usefulness of the planned route is congestion relief on the existing road network and shortening the time of travel in relation to the zero option (without investment). The traffic safety analysis considers the effect of the route geometry and location of interchanges (in the case of expressways and motorways) on the probability of road incidents. The environmental impacts of the project considered in this research include its effect on the vehicle exhaust emissions and the associated clearing of forests and habitat fragmentation. The assessment was carried out by scoring. The above-mentioned criteria were combined in the final assessment by the objective function, taking into account the routing effectiveness and the estimated cost of the investment. The application of the method is presented on the basis of different options of linking expressway S3 with the A4 motorway in the Wrocław-Bolków corridor.

**KEYWORDS:** assessment of options, investment effectiveness analysis, multi-criteria analysis, planning.

DOI: 10.7409/rabdim.018.010

<sup>1)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Plac Grunwaldzki 11, 50 - 377 Wrocław; maciej.kruszyna@pwr.edu.pl

<sup>2)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Plac Grunwaldzki 11, 50 - 377 Wrocław; gabriel.suchy@pwr.edu.pl (✉)

## 1. WSTĘP

Praktyka wskazuje, że w procesie inwestycyjnym w Polsce za mało uwagi poświęca się projektowaniu na etapach początkowych – planistycznym i koncepcyjnym. Brak pogłębionej analizy wielowariantowej powoduje wybór mniej korzystnego (sub-optimalnego) przebiegu trasy. Błędy popełnione na etapie projektu koncepcyjnego często są trudne, a nawet niemożliwe do skorygowania w późniejszych stadiach projektowych. Na podstawie tego typu opracowań uchwalane są miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego (MPZP), rezerwowane są grunty pod inwestycje drogowe, a czasem nawet prowadzony jest wykup gruntów. Już w momencie rozpisania przetargu na projekt budowlany, a w szczególności w przypadku przetargu realizowanego w formule „Projektuj i Buduj”, nie ma możliwości istotnej zmiany przebiegu połączenia drogowego; możliwe są jedynie drobne korekty jego geometrii. Zaniechania na etapie koncepcji prowadzą do wzrostu kosztów inwestycji oraz obniżenia jej efektywności.

Jednym z powodów zaniedbań na etapie koncepcji jest duża czasochłonność i pracochłonność opracowania wariantów przebiegu trasy i ich miarodajnej oceny według obowiązujących standardów. Procedury oceny inwestycji ujęte w "Niebieskiej Księdze" są bardzo szczegółowe, a przez to żmudne i kosztowne w stosowaniu. Stąd wynika potrzeba opracowania łatwej metody dotyczącej oceny wstępnej wielu wariantów przebiegu trasy. Ocena taka prowadziłaby do wyłonienia 2-3 wariantów, które dopiero w dalszej perspektywie mogłyby zostać ocenione z użyciem całościowej procedury, ujętej w Niebieskiej Księdze [1].

W pracy [2] przedstawiono wizję dróg mających sprostać założeniom zrównoważonego rozwoju oraz wymagania, jakie ma spełnić sieć drogowa w zakresie zapewnienia mobilności i dogodnego transportu towarów, bezpieczeństwa użytkowników oraz ochrony środowiska. Aby wyjść na przeciw tym oczekiwaniom, sformułowano trzy kluczowe kryteria, mające stanowić o ocenie przydatności inwestycji drogowej w danym wariantcie: użyteczności, bezpieczeństwa ruchu oraz wpływu na środowisko. Uwzględnienie kosztów uzyskanych korzyści prowadzi do uzyskania miary efektywności inwestycji.

W artykule zaproponowano metodę prostej oceny wielokryterialnej różnych wariantów dróg o ograniczonej dostępności (klasy A lub S). Omówiono także zastosowanie opisanej procedury do oceny wyznaczania przebiegów proponowanej trasy S5 Wrocław-Bolków w ramach korytarza transportowego Wrocław-Praga [3].

## 1. INTRODUCTION

The practice shows that in Poland too little attention is paid to the design aspects at the preliminary, i.e. planning and conceptual design stages of investments. Without an in-depth multi-option analysis a less advantageous (sub-optimal) routing may be chosen. It is difficult, if at all possible, to remedy the errors that were made at the conceptual stage during the later stages of engineering. These documents are used as the basis for developing local master plans, allocating and sometimes even acquiring land for road investments. It is no longer possible to introduce major changes to routing of the road connection at the time of issuing the call for tenders for preparation of the planning submission documents, in particular in the case of Design and Build tenders. Only minor revisions of the road geometry are possible at that time. Lack of action at the conceptual design stage leads to a higher cost and lower efficiency of the investment.

One of the causes of the above-mentioned failure to act at the conceptual stage of the investment is a high input of time and labour needed for developing the routing options and for their robust assessment according to the current standards. The Blue Book investment assessment procedures are very detailed and, as a result, they are laborious and costly in application. Hence the need for a simple method for preliminary assessment of several routing options. It should lead to pre-selecting two to three options for final assessment using the comprehensive procedure of the Blue Book [1].

A vision of sustainable roads that meets the mobility, convenience of goods transport, safety of users and environmental protection requirements defined for the road network is presented in [2]. Three main criteria for assessing the usefulness of each option of a road investment have been formulated, bearing in mind the above-mentioned expectations. These criteria are: usefulness of the road, road safety and environmental impact. Considering the cost of the benefits gained owing to the investment provides a measure of its efficiency.

A simple multi-criteria analysis method is proposed in this paper for assessing different options of limited-access roads (class A or S according to the Polish classification system). Application of this procedure for assessing the routing options of the proposed Wrocław-Bolków section of the S5 road in the Wrocław-Prague corridor [3] is also described.

## 2. OPIS PROCEDURY

Przyjęta procedura łączy kryteria użyteczności, bezpieczeństwa i środowiskowe. Droga podlega ocenie według każdego z wymienionych kryteriów. W ramach procedury, w celu obliczenia efektywności ekonomicznej przedsięwzięcia, wykonuje się zgrubne oszacowanie kosztów inwestycji, porównując osiągnięte efekty z poniesionymi wydatkami. Ocenę ostateczną wariantu przedstawia wzór (1):

$$O = \frac{U \cdot w + E + S}{C}, \quad (1)$$

gdzie:

- $U$  – liczba punktów za użyteczność drogi (1 - 70 pkt),
- $w$  – wskaźnik efektywności połączenia wg [4],
- $E$  – liczba punktów przyznana za wpływ na środowisko (1 - 15 pkt),
- $S$  – liczba punktów przyznana za bezpieczeństwo ruchu (1 - 15 pkt),
- $C$  – łączny szacunkowy koszt inwestycji [EUR].

Elementem składowym zastosowania danego kryterium jest ocena punktowa wykonana na podstawie zaproponowanego zestawu wskaźników – podkryteriów. Liczba punktów możliwych do uzyskania w poszczególnych kryteriach i podkryteriach może zostać łatwo dostosowana do aktualnej strategii państwowej lub celów zamawiającego. Dodatkowo przewidziano możliwość opcjonalnego przydzielenia punktów premialnych lub karnych, w ramach poszczególnych kryteriów (wg oceny eksperckiej), celem uwzględnienia innych czynników, nieuwjętych w podstawowej procedurze, a istotnych w indywidualnym przypadku (np. przebieg ocenianego wariantu w pobliżu Parku Narodowego wg kryterium środowiskowego). Ponadto, aby umożliwić bardziej miarodajne ich porównanie w przypadku występowania zbliżonych przebiegów, w ocenie ujęto także efektywność wyznaczania tras poszczególnych wariantów. Schemat blokowy, przedstawiający przebieg procedury, przedstawiono na Rys. 1.

## 3. DANE WEJŚCIOWE

Do oceny wykorzystywane są następujące podstawowe dane wejściowe:

- prognoza ruchu na sieci drogowej w analizowanym obszarze, np. opracowana metodą korelacji do wzrostu PKB,

## 2. DESCRIPTION OF THE PROCEDURE

The adopted procedure combines the usefulness, traffic safety and environmental impact criteria. Each of the above-mentioned criteria is applied in the assessment of the road in question. As part of the procedure, in order to determine the cost efficiency of the investment, a rough estimation of the investment costs is carried out comparing the obtained effects with the outlays. The final assessment of the option is expressed by formula (1):

where:

- $U$  – score for usefulness of the road (1-70 points),
- $w$  – efficiency of connection according to [4],
- $E$  – score for environmental impact (1-15 points),
- $S$  – score for road safety (1-15 points),
- $C$  – estimated total cost of the investment [EUR].

The component of application of a given criterion is scoring performed on the basis of the proposed set of indices called subcriteria. The maximum score per a (sub-) criterion can be easily adapted to the current strategy of the government or to the Employer's objectives. In addition, bonuses or penalties can be given for the respective criteria (according to the expert assessment) in order to consider factors other than included in the basic procedure that may be significant for a particular case (for example application of environmental criterion for routing of the assessed option near a national park). Moreover, for a more reliable comparison of similar routes, the assessment includes also route efficiency of the different options. The flow chart of the procedure is presented in Fig. 1.

## 3. INPUT DATA

The following input data are used in the assessment:

- traffic forecast for the road network in the area under analysis obtained, e.g. by correlation to the GDP growth rate,
- network model (for example in the form of a graph),
- initial geometry of the proposed options – curve radii, lengths of straight sections,
- proposed locations of interchanges – accessibility of the proposed route and possibility of taking over traffic from other connections,

- model sieci (np. w formie grafu),
- wstępna geometria proponowanych wariantów – promienie luków, długości prostych,
- proponowane rozmieszczenie węzłów – dostępność projektowanej trasy i zdolność przejmowania ruchu z innych połączeń,
- informacje topograficzne (w tym rozmieszczenie obszarów cenny środowiskowo, np. Natura 2000).

- topographic information (including locations of areas of environmental value, such as Natura 2000 sites).

According to [5] the nodes of the road network model should be at the smallest municipalities (in Poland gmina) or smaller administrative units, such as towns, industrial areas and the branches should be the existing roads (national, regional, more important sub-regional roads or local roads if they play a major role in handling of traffic

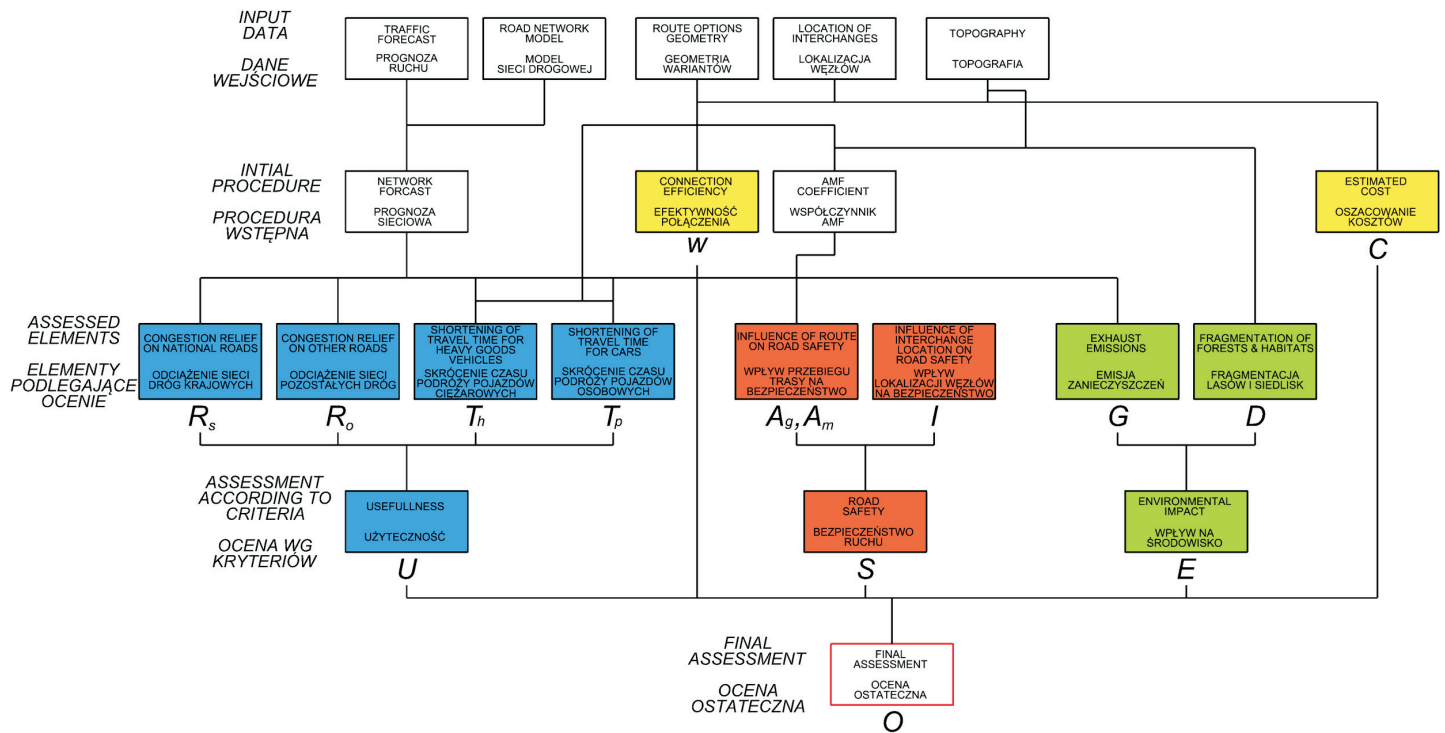


Fig. 1. The block diagram showing the procedure leading to the evaluation of each variant

Rys. 1. Schemat blokowy przebiegu procedury prowadzącej do oceny poszczególnych wariantów

Zgodnie z [5] węzłami modelu sieci powinny być gminy lub mniejsze jednostki administracyjne, np. poszczególne miasta, obszary przemysłowe, itp., zaś jej gałęziami – drogi istniejące (krajowe, wojewódzkie, ważniejsze powiatowe lub gminne, jeżeli odgrywają znaczącą rolę w przenoszeniu ruchu między węzłami). Jeżeli są dostępne, można użyć również bardziej szczegółowych danych ruchowych, np. pozyskanych z makroskopowych modeli ruchu, takich jak macierze początku – końca podróży, wyników pomiarów, czy ankiet.

W omawianym przykładzie przeanalizowano pięć wariantów dodatkowego połączenia drogowego między autostradą A4 a drogą ekspresową S3, zaprezentowanego w [3]. Wariant 1 rozpoczyna się w Węźle Udanin (A4), a kończy w Węźle Jawor (S3). W wariantach 1 występują łącznie 4

between the nodes). More detailed traffic data can be used if they can be obtained, for example, from macroscopic traffic flow models, such as origin-destination matrices, traffic counting or polling surveys.

In the example under analysis five options of an additional road connection between A4 motorway and S3 expressway are considered, as presented in [3]. Option 1 starts on the interchange Udanin (on A4 motorway) and ends on the interchange Jawor (on S3 expressway). Option 1 includes 4 interchanges in total, including two new ones: interchange Jenków – on the junction with regional road No. 345 and interchange Marcinowice (designed to handle local traffic). The length of option 1 is 19.4 km. The routes of options 2A and 2B coincide over a majority of their lengths. The same applies to options 3A and 3B.



węzły, w tym 2 nowe: Jenków z DW345 oraz Marcinowice (obsługa lokalna). Długość wariantu 1 wynosi 19,4 km. Warianty 2A i 2B na większości trasy mają jednakowe przebiegi. Podobnie jest w przypadku wariantów 3A i 3B. Warianty 2A i 2B rozpoczynają się w Węźle Kostomłoty (A4), natomiast warianty 3A i 3B w nowoprojektowanym Węźle Piotrowice (A4). Trasy wszystkich czterech wariantów – 2A, 2B, 3A i 3B, łączą się w okolicy miejscowości Dobromierz i po krótkim jednakowym przebiegu rozdzielają się na dwa odcinki, z których pierwszy – wspólny dla wariantów 2A i 3A – prowadzi do Węzła Bolków (S3), a drugi – wspólny dla wariantów 3A i 3B – do Węzła Wrony (S3). Warianty 2A i 2B zawierają 6 węzłów, w tym 4 nowe: Udanin, Jaroszów, Strzegom, Dobromierz. Długość wariantu 2A wynosi 39,0 km, natomiast 2B 39,8 km. W wariantach 3A i 3B przewidziano 8 węzłów, z czego 6 stanowią węzły nowe: początkowy węzeł Piotrowice (A4) oraz węzły Wawrzeńczyce, Ibramowice, Żarów, Stanowice, Strzegom i Dobromierz. Wariant 3A ma długość 43,3 km, natomiast wariant 3B 46,4 km. Przebiegi poszczególnych wariantów przedstawiono na Rys. 2.

Options 2A and 2B start on the interchange Kostomłoty (on A4 motorway) and options 3A and 3B - on the planned interchange Piotrowice (on A4 motorway). The routes of all the four options: 2A, 2B, 3A and 3B meet near Dobromierz, continue for a short distance on the same route and then fork into two links - the first one, common to options 2A and 3A, leading to the interchange Bolków (S3) and the second one, common to options 3A and 3B, leading to the interchange Wrony (S3). Options 2A and 2B include six interchanges, including the following four new ones: Udanin, Jaroszów, Strzegom and Dobromierz. The lengths of options 2A and 2B are 39.0 km and 39.8 km respectively. In options 3A and 3B there are eight interchanges, including six new ones: the starting interchange Piotrowice (A4) and Wawrzeńczyce, Ibramowice, Żarów, Stanowice, Strzegom and Dobromierz interchanges. The lengths of options 3A and 3B are 43.3 and 46.4 km respectively. The paths of the respective options are presented in Fig. 2.

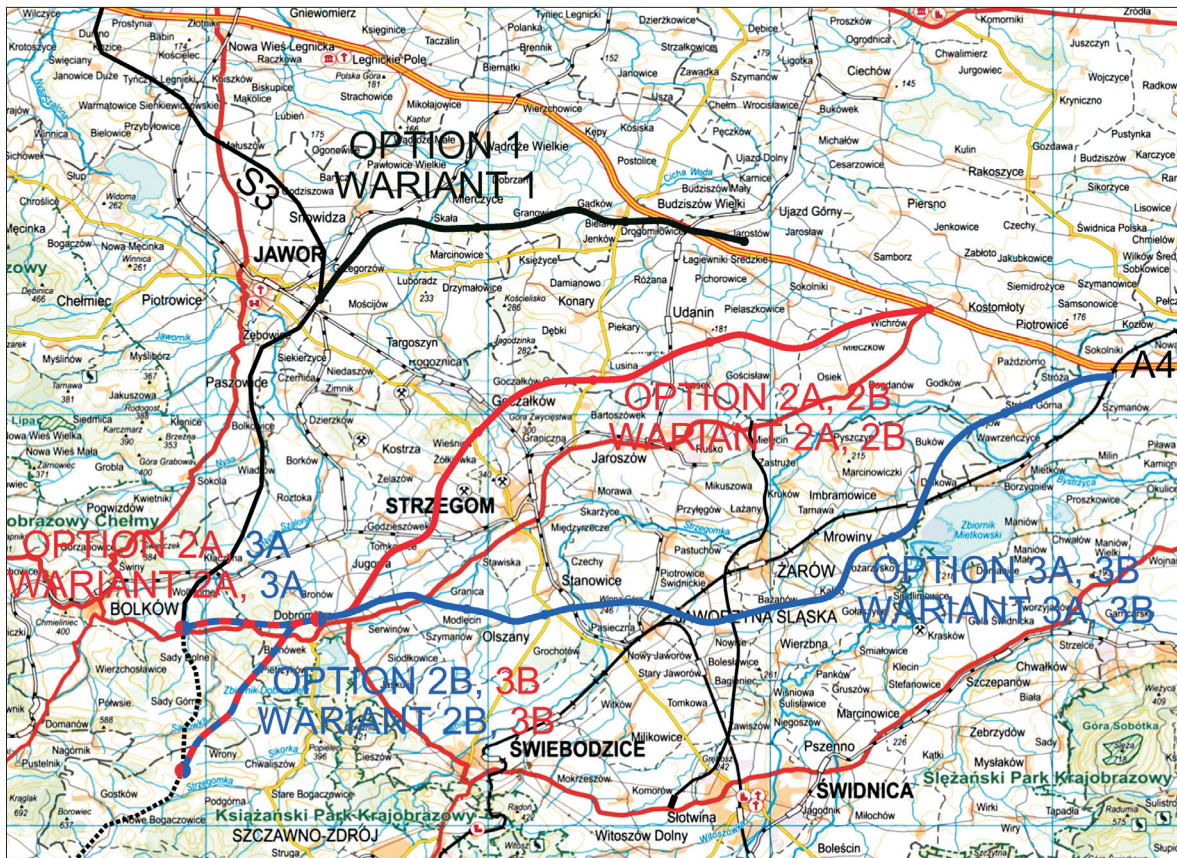


Fig. 2. The courses of road variants proposed in a described example [13]  
Rys. 2. Przebieg proponowanych wariantów z omawianego przykładu [13]

## 4. PROCEDURA WSTĘPNA

Następnym krokiem przeprowadzanej analizy jest przetworzenie danych ruchowych w sposób umożliwiający ich zastosowanie w dalszej analizie. Jako cel procedury wstępnej obrano przybliżone określenie zmian ruchowych w obszarze planowanej inwestycji. Informacje te stanowią podstawę oceny według kryterium użyteczności. Najpierw należy wpisać projektowane trasy w model sieci z uwzględnieniem uwarunkowań dostępności (lokalizacja węzłów w danym wariacie), a następnie oszacować ilości ruchu lokalnego sieci (wewnętrznego w modelu) oraz tranzytowego przez sieć (zewnętrznego), który zostanie przejęty przez planowane połączenie w poszczególnych wariantach. Ostatnim krokiem procedury wstępnej jest określenie natężeń ruchu na sieci drogowej po wybudowaniu projektowanej trasy. W tym celu można użyć również bardziej skomplikowanych narzędzi (w zależności od dostępnej puli danych wejściowych). W przykładzie posłużono się modelem sieci drogowej przedstawionym na Rys. 3 w formie grafu.

## 4. INITIAL PROCEDURE

The next step of the analysis is processing of the traffic data as required for the purpose of further analysis. The objective set for the initial procedure was rough determination of changes to the traffic in the investment area. This information will be the basis of assessment based on the usefulness criterion. As the first step, the planned routes are input in the network model, taking into account the accessibility conditions (locations of interchanges in a given option) and then the traffic volumes are estimated for both local traffic (internal, i.e. within the model) and transit (external) traffic which will be taken over by the planned connection in the respective options. The last step of the initial procedure is determination of the traffic volumes in the road network after construction of the planned route. This can be done also with more sophisticated tools (depending on the available amount of input data). The example uses the road network model represented by a graph in Fig. 3.

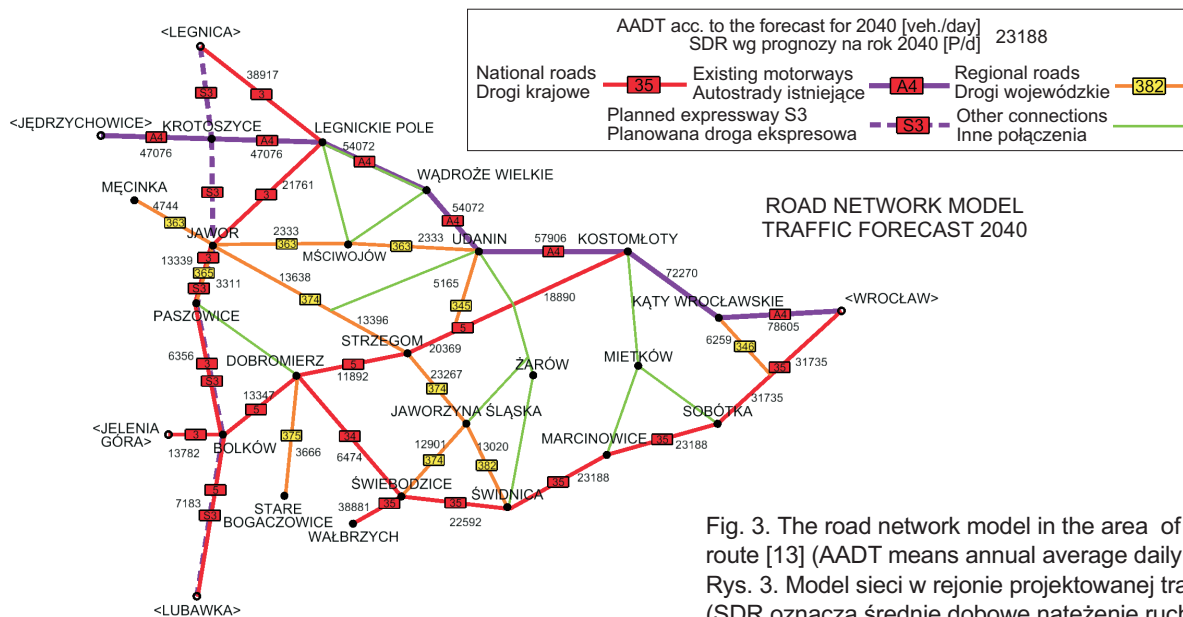


Fig. 3. The road network model in the area of proposed route [13] (AADT means annual average daily traffic)  
Rys. 3. Model sieci w rejonie projektowanej trasy [13] (SDR oznacza średnie dobowe natężenie ruchu w roku)

## 5. OGÓLNA ZASADA PRZYDZIELANIA PUNKTÓW

Przydzielenie poszczególnych punktów do podkryteriów odbywa się jedną z trzech proponowanych poniżej metod:

- 1) Porównanie z minimum korzystnym dodatnim.
- 2) Porównanie z minimum korzystnym ujemnym.

## 5. THE GENERAL PRINCIPLE OF ASSIGNING POINTS

Points are awarded to subcriteria using one of the following three methods:

- 1) Comparison with a positive advantageous minimum,
- 2) Comparison with a negative advantageous minimum,



## 3) Porównanie z maksimum niekorzystnym.

Metody te wyrażają się wzorami (2)-(4):

$$N^{(1)} = N_{\max} \cdot \frac{p}{p_{\min}}, \quad (2)$$

$$N^{(2)} = N_{\max} \cdot \left( 2 - \frac{p}{p_{\min}} \right), \quad (3)$$

$$N^{(3)} = N_{\max} \cdot \left( 1 - \frac{p}{p_{\max}} \right), \quad (4)$$

gdzie:

$N^{(i)}$  – ocena w danym podkryterium (wg  $i$ -tej metody),

$N_{\max}$  – liczba punktów zastosowana przy ocenie danego parametru,

$p$  – wartość danego parametru w analizowanym wariancie,

$p_{\min}$ ,  $p_{\max}$  – najmniejsza i największa wartość danego parametru (we wszystkich wariantach).

Pod zmienną  $p$  w powyższych wzorach należy podstawić parametr podlegający ocenie w danym podkryterium. Metoda 1 zostanie użyta do oceny zmiany prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku ze względu na geometrię trasy  $A_g$  i rozmieszczenie węzłów  $I$ , oceniane w kryterium bezpieczeństwa ruchu. Metoda 2 znajdzie zastosowanie w ocenie podkryteriów oceny użyteczności – skrócenia czasu podróży pojazdów ciężarowych i osobowych  $T_p$ , odciążenia sieci dróg krajowych  $R_s$  oraz odciążenia sieci dróg wojewódzkich i innych  $R_o$  w kryterium użyteczności. Metoda 3 posłuży do oceny podkryterium najniebezpieczniejszego łuku kołowego trasy  $A_m$  w kryterium bezpieczeństwa ruchu oraz emisji zanieczyszczeń G i wycinki lasów D w kryterium środowiskowym. Szczegółowe zasady wyznaczania poszczególnych parametrów zostaną przedstawione w dalszej części artykułu.

Ostateczna suma punktów w danym kryterium jest równa sumie punktów w poszczególnych podkryteriach oraz punktów premiowych lub karnych. W związku z tym dopuszcza się przekroczenie podstawowej liczby punktów do osiągnięcia w danym kryterium lub osiągnięcie oceny ujemnej. Takie podejście czyni metodę bardziej elastyczną oraz pozwala na uwzględnienie czynników wyjątkowych.

Punkty premiowe/karne nie powinny każdorazowo przekroczyć 20% punktów przydzielanych w danym kryterium, tj. maksymalna kara/premia w kryterium użyteczności wynosi +/- 14 pkt, a w kryteriach bezpieczeństwa i środowiskowym +/- 3 pkt.

## 3) Comparison with a disadvantageous maximum.

These methods are expressed by equations (2)-(4):

$$N^{(1)} = N_{\max} \cdot \frac{p}{p_{\min}}, \quad (2)$$

$$N^{(2)} = N_{\max} \cdot \left( 2 - \frac{p}{p_{\min}} \right), \quad (3)$$

$$N^{(3)} = N_{\max} \cdot \left( 1 - \frac{p}{p_{\max}} \right), \quad (4)$$

where:

$N^{(i)}$  – score in a given sub-criterion (using the  $i^{\text{th}}$  method),

$N_{\max}$  – number of points applied in assessing a given parameter,

$p$  – value of a given parameter in the analysed option,

$p_{\min}$ ,  $p_{\max}$  – the smallest and the highest value of a given parameter (in all the options).

Variable  $p$  in the above equations is used to input the parameter assessed in a given sub-criterion. Method 1 will be used for assessing the change of the probability of road accidents due to route geometry  $A_g$  and location of interchanges  $I$ , assessed in the road safety criterion. Method 2 will be used for assessing the subcriteria of the usefulness criterion, i.e. shortening of the time of travel of heavy goods vehicles  $T_h$  and cars  $T_p$ , relieving congestion on the national roads network  $R_s$  and on the regional and other roads  $R_o$ . Method 3 will be used for assessing the sub-criterion of the most dangerous circular arch of the route  $A_m$  in the traffic safety criterion and the exhaust emissions G and forest clearing subcriteria of the environmental criterion. The detailed principles of determining the respective parameters are presented further in the paper.

The final score in a given criterion equals the sum of points awarded in the respective subcriteria plus any bonus and minus any penalty points, as appropriate. Thus it is possible to exceed the maximum base score in a given criterion or get a negative score. This makes the method more flexible and enables allowing for extraordinary factors.

In each case the bonus/penalty points should not exceed 20% of the maximum number of points (maximum score) in a given criterion, and thus the maximum numbers of bonus/penalty points in the usefulness criterion are +/- 14 and +/- 3 in the safety and environmental criteria.

## 6. KRYTERIUM UŻYTECZNOŚCI

W zaproponowanej metodzie kryterium użyteczności rozpatruje się pod kątem odciążenia sieci drogowej przez planowaną inwestycję (wymiar lokalny oraz regionalny) oraz skrócenia czasu podróży przez korytarz docelowy, w ramach którego realizowana jest dana inwestycja (wymiar ponadregionalny). Za podstawową miarę odciążenia sieci drogowej przyjęto sumę zmian średniego dobowego natężenia ruchu na poszczególnych odcinkach sieci, pomnożonych przez długość tych odcinków ( $P \cdot \text{km}/24\text{h}$ ). Oblicza się ją na podstawie analiz ruchowych dokonanych w procedurze wstępnej w poszczególnych wariantach, osobno w odniesieniu do dróg krajowych i wojewódzkich (oraz wybranych dróg niższej kategorii, jeżeli natężenie ruchu lub funkcja uzasadniająca włączenie ich do modelu) w 20. roku eksploatacji

$$R_s = \sum_{i=0}^k Q_{0,i} L_i - \sum_{i=0}^k Q_i L_i, \quad (5)$$

$$R_o = \sum_{j=0}^l Q_{0,j} L_j - \sum_{j=0}^l Q_j L_j, \quad (6)$$

gdzie:

$R_s$  – odciążenie sieci dróg krajowych,

$R_o$  – odciążenie sieci dróg wojewódzkich i innych),

$Q_{0,i}, Q_i$  – natężenia średnie dobowe roczne [ $P/24\text{h}$ ] na  $i$ -tym odcinku dróg krajowych w 20. roku okresu eksploatacji planowanej inwestycji, odpowiednio w wariantach bezinwestycyjnym (zerowym) oraz analizowanym,

$Q_{0,j}, Q_j$  – natężenia średnie dobowe roczne [ $P/24\text{h}$ ] na  $j$ -tym odcinku dróg wojewódzkich i innych, w 20. roku okresu eksploatacji planowanej inwestycji, odpowiednio w wariantach bezinwestycyjnym (zerowym) oraz analizowanym,

$L_i$  – długość  $i$ -tego odcinka dróg krajowych,

$L_j$  – długość  $j$ -tego odcinka dróg wojewódzkich i innych,

$k, l$  – odpowiednio liczba odcinków dróg krajowych lub wojewódzkich i innych.

Skrócenie czasu podróży rozumie się jako różnicę pomiędzy czasem podróży na wybranym wycinku korytarza połączenia podstawowego planowanej inwestycji, realizowanej po drogach wariantu bezinwestycyjnego (tj. istniejących i planowanych innych, niż analizowana) a czasem podróży z wykorzystaniem trasy projektowanej w danym wariantcie.

## 6. USEFULNESS CRITERION

In the proposed method the usefulness criterion is considered in terms of relieving congestion on the road network by the planned investment (at the local and regional levels) and shortening the time of travel by the final corridor which the project forms part of (at a higher than regional level). The adopted basic measure of relieving congestion on the road network is the sum of changes to the average annual daily traffic on the respective links multiplied by their lengths ( $\text{veh.} \cdot \text{km}/\text{day}$ ). It is calculated on the basis of traffic analyses carried out in the preliminary procedure in the respective options, separately for the national and regional roads (and for selected roads of lower class, if their incorporation in the model is justified by the volume of traffic carried by them or by their function) in the 20<sup>th</sup> year of trafficking

where:

$R_s$  – congestion relief on the national roads network,

$R_o$  – congestion relief on regional and other roads,

$Q_{0,i}, Q_i$  – annual average daily traffic [ $\text{veh.}/\text{day}$ ] on the  $i^{\text{th}}$  segment of national roads in the 20<sup>th</sup> year of trafficking for the zero option (without investment) and for the option under analysis,

$Q_{0,j}, Q_j$  – annual average daily traffic [ $\text{veh.}/\text{day}$ ] on the  $j^{\text{th}}$  segment of regional or other roads in the 20<sup>th</sup> year of trafficking for the zero option (without investment) and for the option under analysis,

$L_i$  – length of the  $i^{\text{th}}$  segment of national roads,

$L_j$  – length of the  $j^{\text{th}}$  of regional and other roads,

$k, l$  – number of a segment of national road and regional and other roads, respectively.

Shortening of the time of travel is understood as a difference between the time of travel on a given section of the corridor of the basic connection of the planned investment using the roads of zero option (i.e. existing roads and planned roads, other than the road under analysis) and the time or travel on the route designed in a given option. It was proposed to calculate the time difference separately for heavy goods vehicles (designated  $T_h$ ) and for cars



Zaproponowano obliczenie różnic czasu osobno w przypadku pojazdów ciężarowych  $T_h$  i osobowych  $T_p$ , ponieważ w zależności od rodzaju dróg oraz ukształtowania terenu, względny zysk w czasie podróży poszczególnych typów pojazdów będzie różny. Prędkości podróży przyjęto na podstawie [1] w zależności od kategorii terenu, zgodnie z Tabl. 1.

(designated  $T_p$ ) to account for different relative time savings for these two groups of vehicles depending on the road type and the topography. The traffic velocities (speeds of travel) were taken according to [1] depending on the terrain type according to Table 1.

Table 1. Traffic velocities  
Tablica 1. Prędkości podróży

Road type / Typ drogi	Traffic velocities / Prędkość podróży	
	[km/h]	
	Heavy goods vehicle HGV Pojazdy ciężarowe	Cars Pojazdy osobowe
Motorway / Autostrada	82.3	114.9
Expressway / Droga ekspresowa	77.4	108.0
Other road in a flat terrain / Inna droga w terenie płaskim	66.9	81.3
Other road in an undulating/mountainous terrain / Inna droga w terenie falistym/górskim	52.5	66.1

Na podstawie powyżej przedstawionych parametrów dokonuje się oceny wariantów. Proponuje się następujący przydział punktów do zastosowania w kryterium użyteczności: odciążenie sieci dróg krajowych  $R_s$  0 - 20 pkt, odciążenie sieci dróg wojewódzkich i innych  $R_0$  0 - 15 pkt, skrócenie czasu podróży pojazdów ciężarowych  $T_h$  0 - 20 pkt, skrócenie czasu podróży pojazdów osobowych  $T_p$  0 - 15 pkt (łącznie 70 pkt). Ocena ostateczna w kryterium użyteczności  $U$  jest równa sumie punktów otrzymanych w poszczególnych podkryteriach oraz ewentualnych punktów premiovych lub karnych. Dodatkowe punkty można przyznać np. ze względu na walory turystyczne trasy lub udogodnienia w obsłudze priorytetowego zakładu przemysłowego. W razie potrzeby i zależnie od celu inwestycji, możliwe jest również wprowadzenie dodatkowych, pozaruchowych czynników w kryterium użyteczności, np. efektywności w niwelowaniu różnic społecznych w zapewnieniu dostępności do placówek edukacyjnych. Możliwość łączenia tak różnych kryteriów w analizie wielokryterialnej przedstawiono w [6]. Ponadto w [4] wprowadza się wskaźnik efektywności połączenia  $w$ , rozumiany jako stosunek teoretycznej najkrótszej trasy realizowanego połączenia, tj. długości łamanej między punktami węzłowymi  $L_t$  do długości rzeczywistej (projektowanej)  $L$

The above-mentioned parameters are used for assessing the options. The following maximum scores are proposed for the usefulness criterion: 0 - 20 points for congestion relief on the national roads network designated  $R_s$ , 0 - 15 points for congestion relief on the regional and other roads designated  $R_0$ , 0 - 20 points for shortening the time of travel of HGV's  $T_h$ , 0 - 15 points for shortening the time of travel of cars  $T_p$  (this giving the maximum total score of 70 points). The total score in the usefulness criterion  $U$  is the sum of points scored in the respective subcriteria plus/minus any bonus/penalty points. For instance, bonus points can be granted for tourist attractiveness of the route or for improvement in handling of traffic to/from a prominent industrial enterprise. If needed, and depending on the investment objective, it is also possible to introduce additional non-traffic factors to the usefulness criterion, such as effectiveness in removing social disparities, providing access to educational facilities, etc. An example of combining such different criteria in a multi-criteria analysis is presented in [6]. In addition, connection efficiency index is introduced in [4], designated  $w$  and defined as a ratio between the theoretical shortest distance of a connection, i.e. the length of poly-line between interchange points  $L_t$  and the actual (design) length  $L$

$$w = \frac{L_t}{L}, \quad (7)$$

gdzie:

- $L$  – całkowita długość projektowanej trasy,
- $L_t$  – teoretyczna długość trasy.

where:

- $L$  – total length of the designed route,
- $L_t$  – theoretical route length.

W warunkach typowych, przy poprawnym trasowaniu drogi, wartość tego wskaźnika nie powinna być mniejsza niż 0,8. W analizowanych wariantach uzyskano  $w=0,90\div 0,92$ . W Tabl. 2 zestawiono ocenę ze względu na użyteczność w poszczególnych wariantach.

In typical conditions and subject to correct routing of the road, its value should not be smaller than 0.8. In the analysed options the value of  $w$  fell in the range 0.90-0.92. The usefulness scores of the respective options are presented in Table 2.

Table 2. Usability grading  
Tablica 2. Ocena użyteczności

Option Wariant	Shortening the time of travel of HGV's on the section Wrocław-Bolków Skrócenie czasu podróży Wrocław-Bolków dla pojazdów ciężarowych $T_h$ [h]		Shortening the time of travel of cars on the section Wrocław-Bolków Skrócenie czasu podróży Wrocław-Bolków dla pojazdów osobowych $T_p$ [h]		Congestion relief on the national road network Odciążenie sieci dróg krajowych $R_s$ [veh. · km/day] [P · km/24h]		Congestion relief on regional and other roads Odciążenie sieci dróg wojewódzkich i innych $R_o$ [veh. · km/day] [P · km/24h]		Number of additional points Liczba punktów dodatkowych [-]	Usefulness score Ocena za użyteczność $U$ [-]
	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów		
Maximum score [-] Maksymalna liczba punktów	20		15		20		15		–	70
–	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów	–	–
1	-0.11	12	-0.15	19	14,433	0	-23,308	15	-15 <sup>*)</sup>	31
2A	-0.17	19	-0.19	16	-387,110	9	-1,718	1	0	45
2B	-0.13	14	-0.16	18	-308,406	7	-4,101	3	10 <sup>**)</sup>	52
3A	-0.18	20	-0.20	15	-885,956	20	-11,810	8	0	63
3B	-0.14	16	-0.17	17	-853,892	19	-14,192	9	10 <sup>**)</sup>	71
<sup>*)</sup> Option 1: penalty -15 points for limited effect on congestion relief of border crossings from adjacent areas Wariant 1: kara -15 za ograniczony wpływ na odciążenie przejść granicznych z sąsiadujących obszarów <sup>**)</sup> Options 2B, 3B: bonus +10 points for additional improvements in travels to the Lubawka border crossing (via S3) Wariant 2B, 3B: premia +10 za dodatkowe udogodnienia w podróżach z kierunku przejścia Lubawka (przez S3)										

## 7. OCENA BEZPIECZEŃSTWA RUCHU

Oceny bezpieczeństwa ruchu dokonuje się na podstawie dwóch czynników: geometrii trasy analizowanego wariantu oraz rozmieszczenia węzłów. Bezpieczeństwo geometrii trasy skwantyfikowano jako wartość współczynnika modyfikacji wypadków  $AMF$  (ang. *accident modification factor*) zgodnie z [7]. W publikacji tej przedstawiono wzór (8):

$$AMF = \frac{L_c + \frac{25480}{R} - 13S}{L}, \quad (8)$$

## 7. ROAD SAFETY ASSESSMENT

The road safety assessment is based on two factors: route geometry of the analysed options and location of interchanges. The geometry related safety was quantified by the value of the accident modification factor  $AMF$  in accordance with [7]. It is calculated with the following equation given in the above-mentioned publication (8):

gdzie:

$L_c$  – długość łuku [m],

$R$  – promień łuku [m],

$S=0$  lub  $1$  – parametr zależny od obecności krzywej przejściowej (1 - z krzywą, 0 - bez krzywej).

W uogólnieniu współczynnikiem  $AMF$ , określanym dla łuków poziomych, wyraża się jako stosunek prognozowanej liczby wypadków na danym łuku do liczby wypadków na odcinku prostym. Zgodnie z tą definicją, efekt korzystny będzie określany przez  $AMF < 1$ , a niekorzystny  $AMF > 1$ . Ponieważ w przypadku łuków o parametrach wymaganych na drogach wyższej klasy wartości  $AMF$  są bliskie 1, czytelniejsze jest przedstawienie  $AMF$  jako zmiany prawdopodobieństwa zaistnienia wypadku oznaczonego w niniejszym kryterium  $A_c$ :

$$A_c = AMF - 1. \quad (9)$$

W celu finalnej oceny bezpieczeństwa geometrii trasy danego wariantu, oblicza się średnią ważoną na całej jej długości  $A_g$ , za wagę przyjmując długość poszczególnych łuków i prostych. Zgodnie z wcześniej przytoczoną definicją parametru  $AMF$  na odcinkach prostych należy przyjąć  $A_c = 0$ . Dodatkowo jako podkryterium zapobiegające projektowaniu potencjalnie niebezpiecznych elementów w planie, wprowadzono parametr  $A_m$ , równy najwyższej wartości  $A_c$  występującej na trasie. Na Rys. 4 przedstawiono wykres zmiany prawdopodobieństwa zaistnienia zdarzenia  $A_c$  w zależności od promienia i długości łuku kołowego (podano wartości promieni stosowane na drogach ekspresowych i autostradach).

where:

$L_c$  – curve length [m],

$R$  – curve radius [m],

$S=0$  or  $1$  – parameter related to the presence of transition curve (1 - with a transition curve, 0 - without a transition curve).

Generally, the accident modification factor  $AMF$ , defined for horizontal curves is expressed as a ratio between the predicted number of accidents on a given curve and the number of accidents on a straight section. According to this definition values lower than one ( $AMF < 1$ ) indicate a beneficial effect when values higher than one ( $AMF > 1$ ) point out a disadvantageous effect of the investment. Since for curves having parameters required for roads of higher classes the value of  $AMF$  approximates 1, it is clearer to present  $AMF$  as a variation of probability of an accident, designated  $A_c$  in this criterion:

For final assessment of the safety of route geometry in a given option, a weighted average is calculated for the whole length  $A_g$ , taking as the weight the length of the respective curves and of the straight sections. According to the  $AMF$  definition as given above, for straight sections  $A_c = 0$ . In addition,  $A_m$  parameter, equal to the maximum value of  $A_c$  occurring on the route is introduced as a sub-criterion intended to prevent designing potentially dangerous horizontal elements of the route. Fig. 4 presents the probability of occurrence of incident  $A_c$  vs. the radius and length of circular arch (these values of radii are applicable for expressways and motorways).

Change of probability of a traffic accident on a curve  $A_c$   
(for radial curves with radiuses within the scope  
of 900-4000 m preceded by a transition curve)  
Zmiana prawdopodobieństwa zaistnienia zdarzenia na łuku  $A_c$   
(dla łuków kołowych o promieniach z zakresu 900-4000 m  
poprzedzonych krzywą przejściową)

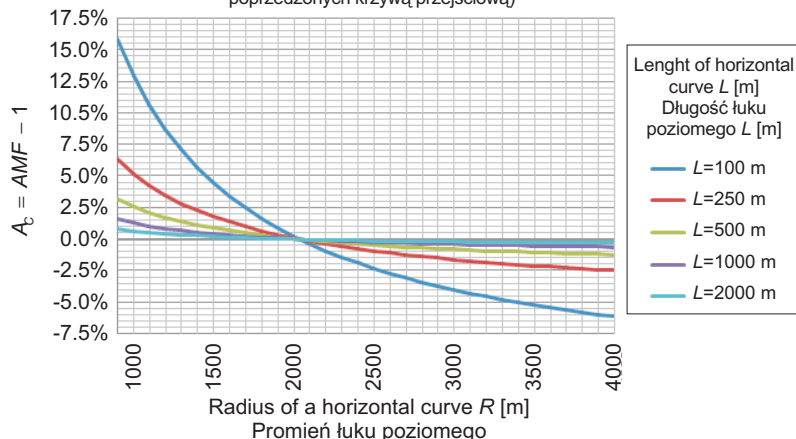


Fig 4. The route safety change of probability of a road accident on a curved section in relation to the arc radius and length (based on [7])

Rys. 4. Zmiana bezpieczeństwa trasy – zmiana prawdopodobieństwa zdarzenia drogowego na łuku kołowym w zależności od promienia i długości łuku (na podstawie [7])



W publikacji [8] można znaleźć wzór opracowany na podstawie danych o wypadkach z Kalifornii, opisujący prognozowaną częstość wypadków na odcinku drogi dwujezdniowej, w zależności od jego parametrów. Na potrzeby niniejszej procedury oceny wielowariantowej wyodrębniono człon uwzględniający wpływ rozmieszczenia węzłów i dostosowano do jednostek układu SI, otrzymując wzór (10):

$$I = e^{0.57 \ln \frac{L_s}{1609}}, \quad (10)$$

gdzie:

$I$  – przewidywany wzrost liczby wypadków na rok ze względu na rozmieszczenie węzłów [-],

$L_s$  – średnia odległość między węzłami [m].

Po wykonaniu obliczeń, w zależności od wartości  $A_g$ ,  $A_m$  oraz  $I$ , przydziela się punkty za bezpieczeństwo od 0 do 5 za każde kryterium (łącznie 15 pkt), które w sumie z punktami premiowymi i karnymi dają ostateczną ocenę w kryterium  $S$ . Punkty premiowe lub karne w poszczególnych wariantach można przyznać np. za obecność szczególnie niebezpiecznych obiektów w otoczeniu trasy, takich jak urwiska, czy zbiorniki wodne. W Tabl. 3 ujęto ocenę ze względu na bezpieczeństwo ruchu.

There is an equation derived on the basis of the road traffic accident data from California presented in [8] which relates the forecasted frequency of road accidents on a dual carriageway to its parameters. For the purpose of the present multi-option assessment procedure a member of the equation has been extracted which takes into account the location of interchanges and has been adjusted to SI units, giving the following equation (10):

where:

$I$  – expected increase in the annual number of accidents in relation to the location of interchanges [-],

$L_s$  – average distance between the interchanges [m].

Following calculations, depending on the values of  $A_g$ ,  $A_m$  and  $I$ , safety scores from 0 to 5 points are given for each criterion (giving the maximum of 15 points) which, together with bonus and penalty points added or deducted as appropriate, give the final score in the  $S$  criterion. For instance, bonus/penalty points in the respective options can be given for presence of particularly dangerous features in the route vicinity, such as scarps or water bodies. Table 3 presents assessment in terms of road safety.

Table 3. Road safety grading

Tablica 3. Ocena bezpieczeństwa w ruchu drogowym

Option Wariant	Average distance between interchanges Średni rozstaw węzłów $L_s$ [m]	Influence of the location of interchanges of the traffic safety Wpływ rozmieszczenia węzłów na bezpieczeństwo $I$ [-]		Averaged influence of the route on safety Uśredniony wpływ przebiegu na bezpieczeństwo $A_g$ [-]		The most disadvantageous effect of the curve on safety Najbardziej niekorzystny wpływ łuku na bezpieczeństwo $A_m$ [-]		Number of additional points Liczba punktów dodatkowych [-]	Road safety score Ocena za bezpieczeństwo ruchu $S$ [-]
		Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów		
Maximum score [-] Maksymalna liczba punktów		5		5		5		–	15
–	–	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów	–	–
1	6 500	2.22	5	0.2%	5	1.5%	4	0	14
2A	7 400	2.39	4	0.2%	5	2.1%	3	0	12
2B	8 000	2.49	4	0.3%	3	3.7%	2	0	9
3A	6 200	2.16	5	0.3%	3	5.9%	0	0	8
3B	6 600	2.24	5	0.3%	3	5.9%	0	0	8

## 8. KRYTERIUM ŚRODOWISKOWE

W obliczu globalnego ocieplenia oddziaływanie na środowisko stało się jednym z najważniejszych elementów, jakie należy uwzględnić w procesie inwestycyjnym. Zaproponowano dwa czynniki wpływające na poziom występowania CO<sub>2</sub> w atmosferze: ilość emisji zanieczyszczeń wytworzona przez ruch samochodowy oraz długość trasy przebiegającej przez tereny leśne i siedliska (przyjętej jednocześnie za miarę wycinki lasów i fragmentacji siedlisk). Obliczenia różnicy w emisjach zanieczyszczeń (w tym gazów cieplarnianych)  $G$  dokonuje się stosując uproszczoną procedurę, opartą na [1], z uwzględnieniem natężeń ruchu na projektowanej drodze, obciążenia sieci drogowej oraz prędkości i stanu nawierzchni na poszczególnych drogach. Za miarę emisji przyjęto zgodnie z [1] koszt emisji w EUR/rok. Proponowane jednostkowe koszty emisji przyjęto zgodnie z Tabl. 4.

Table 4. Unit costs of emissions

Tablica 4. Jednostkowe koszty emisji

Road type / Typ drogi	Unit cost of emissions / Jednostkowe koszty emisji [EUR/veh./(1000 km)] / [EUR/P/(1000 km)]
Regional and other roads / Drogi wojewódzkie i inne	6.9
National roads / Drogi krajowe	6.6
Expressways / Drogi ekspresowe	5.9
Motorways / Autostrady	

Podane wartości dotyczą samochodów osobowych. Upraszczając, pominięto wpływ struktury rodzajowej na drodze. Ostatecznie uzyskano zależność (11):

$$G = 365 \cdot 10^{-6} (24.83Q_j L_j + 27.78R_s + 28.78R_o), \quad (11)$$

gdzie:

$Q_j$  – natężenie średnie dobowe roczne na  $j$ -tym odcinku projektowanej drogi (w danym wariantcie) [P/24h],

$L_j$  – długość  $j$ -tego odcinka projektowanej drogi [m],

$R_s, R_o$  – oznaczenia jak we wzorach (5) i (6).

Należy zwrócić uwagę, że ponieważ parametry  $R_s$  i  $R_o$  mają wartości ujemne, wpływ obciążenia sieci na środowisko jest pozytywny.

Fragmentacja środowiska została wskazana w publikacji [9] jako jeden z kluczowych czynników i uwzględniona łącznie z wycinką lasów – niszczeniem ostoi leśnych. Wpływ inwestycji oszacowano na podstawie długości dróg prowadzonych przez tereny leśne i siedliska, oznaczonej jako  $D$  [m].

## 8. ENVIRONMENTAL CRITERION

With the increase in the global warming the environmental impacts of the investment have become one of the key elements to be taken into account. Two factors influencing the level of CO<sub>2</sub> in air are proposed: the amount of emissions generated by vehicles and the length of route running across forested land and habitats (the latter used also as a forest clearing and habitat fragmentation measure). The difference of emissions (including greenhouse gasses)  $G$  is calculated using a simplified procedure based on [1], taking into account the traffic volume on the designed road, relief of congestion on the national road network and the traffic velocities and the pavement conditions on the respective roads. The cost of emissions in EUR/year has been taken as the measure of emissions in accordance with [1]. The proposed unit costs of emissions have been taken according to Table. 4.

The values concern cars. To put it in simple terms, in this way the effect of traffic composition has been ignored. Finally, the following equation has been obtained (11):

where:

$Q_j$  – average annual daily traffic on the  $j^{\text{th}}$  segment of the planned road (in a given option) [veh./day],

$L_j$  – length of the  $j^{\text{th}}$  segment of the planned road [m],

$R_s, R_o$  – as defined in equations (5) and (6).

It is worthwhile noting that with negative values of  $R_s$  and  $R_o$  the congestion relief on the road network has a beneficial effect on the natural environment.

Fragmentation of the natural environment has been named in [9] as one of the key factors and included together with clearing of forests i.e. the destruction of forest refuges. The influence of the investment has been estimated on the basis of the length of roads running through forests and habitats, designated  $D$  [m].

Bardziej szczegółowa metoda modelowania wpływu projektowanej inwestycji drogowej na środowisko leśne została przedstawiona w [10]. Pozwala ona zróżnicować obszary leśne pod względem ich wartości, uwzględniając wiek drzewostanu, a także przewidzieć np. wpływ budowy drogi na zaburzenie naturalnego systemu wód powierzchniowych. Do oceny wg kryterium środowiskowego proponuje się liczbę punktów za parametr G 5 pkt, a za parametr D 10 pkt (łącznie 15 pkt). Sumaryczna ocena *E* sumuje punkty za te dwa podkryteria oraz ewentualne punkty premiowe lub karne.

Nie można pominąć również innych czynników oddziaływania na środowisko naturalne, zanieczyszczenia hałasem. W [9] podkreślono wagę otoczenia szczególną ochroną obszarów Natura 2000. Stąd w ocenie środowiskowej kluczowa jest identyfikacja obszarów środowiska naturalnego, w szczególności obszarów chronionych w pobliżu których przebiega planowana inwestycja, takich jak Natura 2000 czy rezerwy. Na tej podstawie należy przyznać punkty karne lub premiowe. Ponadto w przypadku przecięcia obszaru chronionego, konieczne jest uwzględnienie podczas analizy kosztowej obiektów inżynierskich budowy przejść dla zwierząt (patrz punkt 9.). Pominięcie tego czynnika będzie prowadzić do niemiarodajnych wyników. Dodatkowo brak wskazania konieczności budowy przejść dla zwierząt, nawet na tak wczesnym etapie inwestycji, może skutkować brakiem alokacji stosownych środków i w znaczący sposób utrudni przeprowadzenie inwestycji. W Tabl. 5 zaprezentowano ocenę środowiskową wariantów z przykładu.

A more detailed method for modelling the influence of the planned road investment on the forest environment is presented in [10]. It enables differentiating forest areas in terms of their value based on the age of trees and to predict, for example, the disturbance to the natural surface water system resulting from the road construction. The following maximum scores are proposed for the environmental criterion: 5 points for G and 10 points for D (giving the total of 15 points). The cumulative score *E* is a sum of points given for these two subcriteria plus/minus any bonus or penalty points.

Other impacts, such as noise pollution, must not be left out. Protection of the Natura 2000 sites is considered of particular importance in [9]. Therefore, identification of environmental areas, in particular protected ones, such as Natura 2000 sites or nature reserves, that are located in the vicinity of the planned route is of key importance for assessment of the environmental impact of the investment. This is the basis for giving penalty or bonus points. Moreover, if a road cuts across a protected area, it is required to include the cost of providing wildlife crossings in the cost analysis of road structures construction (see 9 below). Otherwise the results can be unreliable. Additionally, if the need of wildlife crossings is not considered, even at such an early stage of the investment, appropriate funds may not be allocated which can significantly affect the investment development process. Environmental assessment of the options of the analysed example is presented in Table 5.

Table 5. Environmental grading  
Tablica 5. Ocena środowiskowa

Option Wariant	Length of route across forests and habitats Długość trasy przez tereny leśne i siedliska <i>D</i> [m]		Difference in the cost of emissions Różnica w koszcie emisji zanieczyszczeń <i>G</i> [EUR/year] [EUR/rok]		Number of additional points Liczba punktów dodatkowych [-]	Environmental score Ocena za oddziaływanie na środowisko <i>E</i> [-]
	Value Wartość	Score Liczba punktów	Value Wartość	Score Liczba punktów		
Maximum score [-] Maksymalna liczba punktów	5		10		–	15
1	0	5	295 000	8	0	13
2A	350	3	1 204 000	2	-3 <sup>*)</sup>	2
2B	350	3	1 522 000	0	-3 <sup>*)</sup>	0
3A	950	0	555 000	6	-1 <sup>**)</sup>	5
3B	950	0	700 000	5	-1 <sup>**)</sup>	4

<sup>\*)</sup> Options 2A, 2B: penalty -3 points for routing in the vicinity of Książ scenic park

Wariant 2A, 2B: kara -3 za przebieg w pobliżu Książańskiego Parku Krajobrazowego

<sup>\*\*)</sup> Options 3A, 3B: penalty -1 point for routing in the vicinity of the Mietków water reservoir

Wariant 3A, 3B: kara -1 za przebieg w pobliżu zalewu Mietków



## 9. KRYTERIUM EKONOMICZNE

W proponowanej metodzie oszacowano zgrubnie koszt inwestycji, korzystając z bardzo uproszczonych obliczeń na podstawie danych statystycznych, w zależności od długości danego wariantu, liczby obiektów inżynierskich i liczby węzłów. Zgodnie z raportem ECA 5/2013 [11], średni koszt całkowity wybudowania 1 km drogi ekspresowej w Europie wynosi 6,2 mln €, tymczasem 1 km autostrady kosztuje 10,9 mln €. Średni koszt inwestycji idącej śladem drogi istniejącej wyniósł 4,7 mln €. Wyliczenia te zostały przeprowadzone na podstawie studium 24 inwestycji z finansowaniem UE w różnych krajach członkowskich, w tym w Polsce.

Przewidywany koszt mostu o rozpiętości do 70 m wynosi ok. 1000 € za 1 m<sup>2</sup>. Przyjęto przeciętną długość obiektów 50 m i szerokość 20 m, szacując koszt wybudowania jednego obiektu na ok. 1 mln €, natomiast koszt wybudowania węzła oszacowano na 5 mln €.

W celu dokładniejszego oszacowania kosztów może być konieczna bardziej szczegółowa identyfikacja obiektów inżynierskich z podziałem na grupy (przepusty, małe, średnie, duże wg rozpiętości), określenie przekrojów poprzecznych w poszczególnych wariantach (jeśli są różne), a także oszacowanie kosztów inwestycji na podstawie kosztu wybudowania trasy w zależności od długości trasy na poszczególnych rodzajach terenu (płaski, nizinny, górski – uwarunkowania wysokościowe rzutujące na objętość robót ziemnych, intensywnie zabudowany/rolny – uwarunkowania własnościowe powodujące wzrost kosztu wykupu gruntów lub konieczne rozbiórki). Szacunkowe wartości kosztu 1 km trasy, w zależności od kategorii terenu oraz poszczególnych grup obiektów, można obliczyć na podstawie kosztów już zrealizowanych inwestycji – np. wg statystyk Eurostat, albo danych GDDKiA, uwzględniając prognozowany wpływ inflacji. Pomocne może okazać się użycie narzędzi GIS. Pozwalają one wziąć pod uwagę szereg innych istotnych czynników, takich jak wpływ na koszty budowy geologii terenu lub wzrost kosztów, związany z koniecznością wykonania prac archeologicznych. Możliwość efektywnego i przejrzystego modelowania pokazano w [12]. Kryterium ekonomiczne nie podlega punktacji; koszt służy jedynie jako dzielnik w ocenie ostatecznej (finalnej). W Tabl. 6 pokazano oszacowanie kosztów poszczególnych wariantów z przyjętego przykładu.

## 10. OCENA KOŃCOWA

Ostatecznej oceny dokonuje się jednocześnie na podstawie przedstawionego wcześniej wyrażenia (1) oraz sumy punktów uzyskanych w kryteriach użyteczności, bezpieczeństwa

## 9. ECONOMIC CRITERION

The proposed method includes rough estimation of the investment cost using very simplified calculations based on statistical data, depending on the route length and on the numbers of structures and interchanges on a given option. According to ECA 5/2013 [11] report, the average cost of construction of 1 km of expressway in Europe is EUR 6.2 million and 1 km of a motorway costs EUR 10.9 million. The average cost of a investment routed on the line of an existing road is EUR 4.7 million. These calculations are based on a study of twenty four EU funded investments completed in different member states, including Poland.

The estimated cost of a bridge of up to 70 m span is ca. EUR 1,000 per square metre. Taking an average length of 50 m and an average width of 20 m we get ca. EUR 1 million estimated construction cost of a bridge and EUR 5 million cost of constructing one interchange.

For a more precise estimation of the cost it may be necessary to provide a more detailed identification of bridges by classification into categories (culverts, small, medium and large bridges - based on span length), specify cross-sections by option (if different) and estimate the cost of road investment depending on the lengths of road sections running in different types of terrain (flat, lowland, mountainous - to account for the effect of elevation changes on the amount of earth works, intensely developed/farmland - to account for different cost of land purchase or the necessary demolitions). The estimated cost of 1 km of the route, taking into account the type(s) of terrain and bridges of the respective categories can be calculated on the basis of the existing, completed investments, for example based on the Eurostat statistics or the data of the Polish highway agency GDDKiA, including the predicted effect of inflation. GIS tools can also be useful. They enable including other factors influencing the cost of investment, such as geological makeup of the area or the cost of archaeological works. An example of efficient and clear modelling is presented in [12]. The economic criterion is not used for scoring; the cost is used only as a divider in the final assessment. Table 6 presents the cost estimate of the different options from the adopted example.

## 10. THE FINAL ASSESSMENT

The final assessment combines the above-mentioned expression (1) and the sum of points awarded in the usefulness, safety and environmental criteria. The final assessment combines the respective criteria, taking into

i środowiskowej. Ocena ostateczna łączy poszczególne kryteria, uwzględniając szacunkowy koszt wykonania, tak jak pokazano w formie schematu blokowego na Rys. 5. Takie podejście prowadzi do otrzymania jednej, łatwo porównywalnej wartości liczbowej w każdym wariantcie, kwantyfikującej uzyskaną korzyść w przeliczeniu na 1 EUR, a więc będącej miarą efektywności inwestycji. Do dalszej, szczegółowej analizy typuje się dwa warianty, które osiągnęły najwyższą wartość oceny finalnej oraz opcjonalnie wariant, który otrzymał najwyższą sumaryczną liczbę punktów. Należy rozważyć, czy dodatkowe korzyści wariantu najwyższej punktowanego (względem wariantów o najwyższej wartości oceny finalnej) uzasadniają ekonomicznie wybór tego wariantu.

account the estimated cost of investment as shown in the form of flow chart presented in Fig. 5. This approach leads to obtaining a single one, easily compared numerical value for each option, providing the measure of the investment efficiency by 1/m EUR quantification. Two options which achieved the highest final score are identified for a further, more detailed analysis optionally accompanied with the option which achieved the highest cumulative number of points. One should consider if additional benefits of the option with the greatest number of points (comparing to the options with the highest final score) justify selection of this option in economics terms.

Table 6. Estimated construction costs  
Tablica 6. Szacunkowe koszty inwestycji

Option Wariant	Length Długość $L$ [m]	Number of road structures Liczba obiektów inżynierskich [-]	Number of interchanges Liczba węzłów [-]	Cost Koszt $C$ [EUR]	Theoretical length Długość teoretyczna $L_t$ [m]	Efficiency of connection Efektywność połączenia $w$ [-]
1	19 450	7	4	46 450 000	17 800	0.92
2A	36 850	20	6	86 850 000	33 770	0.92
2B	39 925	24	6	93 925 000	36 500	0.91
3A	43 350	18	8	101 350 000	39 900	0.92
3B	46 400	22	8	108 400 000	41 850	0.90

Ostateczną ocenę wariantów przedstawiono w Tabl. 7. Wariant 1 otrzymał najwyższą wartość oceny ostatecznej spośród analizowanych wariantów. Jest to rozwiązanie kosztowo najefektywniejsze. Wariant 3A osiągnął najwyższą wartość oceny finalnej z pozostałych wariantów. Wariant 3B osiągnął natomiast największą liczbę punktów.

The final assessment of options is presented in Table 7. Option 1 got the highest final score among the analysed options. It is the most cost effective option. Option 3A gained the highest final score among the remaining options. However option 3B picked up the highest point score.

Table 7. Variant evaluation  
Tablica 7. Ocena wariantów

Option Wariant	Cost Koszt $C$ [EUR]	Efficiency of connection Efektywność połączenia $w$ [-]	Usefulness score Efektywność połączenia $U$ [-]	Environmental impact score Ocena za oddziaływanie na środowisko $E$ [-]	Road safety score Ocena za bezpieczeństwo ruchu $S$ [-]	Cumulative score Ocena sumaryczna [-]	Final score Ocena ostateczna $O$ [1/EUR]
1	46 450 000	0.92	31	13	14	58	1.20
2A	86 850 000	0.92	45	2	12	59	0.64
2B	93 925 000	0.91	52	0	9	61	0.60
3A	101 350 000	0.92	63	5	8	76	0.70
3B	108 400 000	0.90	71	4	8	83	0.70

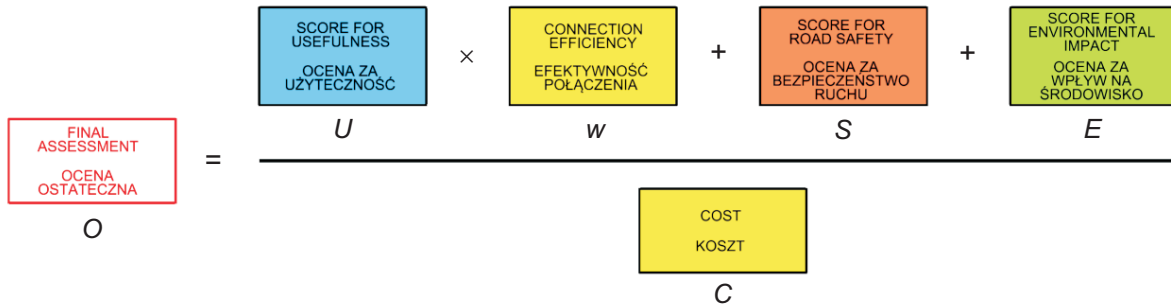


Fig. 5. Block diagram showing the final grade combining all criteria under evaluation

Rys. 5. Schemat blokowy przedstawiający ocenę końcową uwzględniającą łącznie wszystkie kryteria

## 11. WNIOSKI

Przedstawiona procedura powinna pozwolić na efektywną i miarodajną ocenę przebiegów inwestycji do celów planistycznych. W uproszczony sposób łączy ona najważniejsze kryteria, pozwalając szybko ocenić wiele wariantów i wybrać najlepsze z nich do dalszych prac. Jednocześnie metoda daje się w łatwy i przejrzysty sposób dostosować do celów danej inwestycji przez modyfikację liczby punktów w poszczególnych kryteriach lub podkryteriach.

W rozpatrywanym przykładzie jako najkorzystniejszy oceniono krótki łącznik między autostradą A4 a drogą ekspresową S3, znacznie odbiegający od istniejącego przebiegu drogi krajowej nr 5. Należy zwrócić uwagę, że już tak krótkie połączenie zapewnia znaczne odciążenie układu dróg niższej kategorii oraz porównywalne do innych wariantów skrócenie czasu podróży dzięki wykorzystaniu istniejących dróg autostradowych. Mimo że korzyści odniesione w przypadku zwycięskiego wariantu są wyraźnie niższe, niż w wariantcie, który otrzymał największą sumaryczną liczbę punktów w poszczególnych kryteriach, najwyższy oceniony wariant pozwala osiągnąć dużo lepszy stosunek korzyści do kosztów. Jest to szczególnie istotne w przypadku wydatkowania pieniędzy publicznych z ograniczonego budżetu, ponieważ podniesienie efektywności poszczególnych inwestycji w skali kraju będzie prowadzić do maksymalizacji korzyści.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] JASPERS, Blue Book – Road Infrastructure, European Commission, 2015  
<https://www.pois.gov.pl>, 29.11.2017
- [2] Adesiyun A., Maagdenberg T., Kowalska-Sudyka M.: Wizja infrastruktury drogowej w Europie w roku 2040. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 6, 3, 2007, 5-21

## 11. CONCLUSIONS

The procedure presented in this paper should enable an efficient and reliable assessment of the investment routes for planning purposes. In a simplified way it combines the most important criteria, enabling quick assessment of several options and selecting the best of them for further steps of the process. Moreover, it can be easily and clearly modified to suit the objectives of a particular investment by modifying the point scores in the respective criteria or subcriteria.

In the analysed example, the option assessed as the most advantageous is a short link between the A4 motorway and S3 expressway, significantly departing from the line of the existing national road No. 5. Note that even such a short link provides significant relief of congestion on roads of lower category accompanied with shortening the time of travel comparable to other options owing to use of the existing motorway sections. Although the benefits of the winning option are distinctly lower than in the case of option that obtained the highest cumulative number of points in the respective criteria, the option with the highest final score enables obtaining a much better benefit-to-cost ratio. This is of particular significance in the case of public funds drawn from a limited budget, since improvement of efficiency of different investments will maximise benefits on a nation-wide scale.

- [3] Kruszyna M., Suchy G.: Logika uzupełnień głównej sieci drogowej. Przegląd Komunikacyjny, 10, 2015, 22-24
- [4] Gawlikowski A., Hozowski S.: Planowanie sieci komunikacji drogowej. WSiP, Warszawa, 1978
- [5] GDDKiA, Stadia i skład dokumentacji projektowej dla dróg i mostów w fazie przygotowania zadań, Warszawa 2005



- [6] *Bhandari S.B., Shahi P.B., Shrestha R.N.*: Multi-criteria Evaluation for Ranking Rural Road Projects: Case study of Nepal. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, **11**, 6, 2014, 53-65
- [7] *Harwood D.W., Council F.M., Hauer E., Hughes W.E., Vogt A.*: Prediction of the Expected Safety Performance of Rural Two - Lane Highways, 2000, US DOT FHA Research Development & Technology Turner - Fairbank Research Center  
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/99207/99207.pdf>, 31.10.2016
- [8] *Bared J., Zhang W.*: Safety Assessment of Interchange Spacing on Urban Freeways, 2007, US DOT FHA Research, Development & Technology Turner - Fairbank Research Center  
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/07031/07031.pdf>, 31.10.2016
- [9] *Bęben D.*: Europejska sieć ekologiczna Natura 2000 a rozwój szlaków transportowych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **8**, 4, 2009, 5-23
- [10] *Tampekis S., Sakellariou S., Fani S., Sfougaris A., Jaeger D., Christopoulou O.*: Mapping the optimal forest road network based on the multi-criteria evaluation technique: the case study of Mediterranean Island of Thassos in Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, **187**, 11, 2015, 687
- [11] Czy środki przeznaczone na drogi w ramach europejskiej polityki spójności są właściwie wydawane?. Europejski Trybunał Obrachunkowy, Raport Specjalny nr 5/2013
- [12] *Effat H.A., Ossman A.H.*: Designing and evaluation of three alternatives highway routes 371 using the Analytical Hierarchy Process and the least-cost path analysis, application in Sinai Peninsula, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, **16**, 2, 2013, 141-151
- [13] *Suchy G.*: Study of new highway connection as a supplement of existing road network. Praca magisterska obroniona na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2015