

dr hab. inż. Agnieszka Leśniak, prof. PK^{1*)}

ORCID: 0000-0002-4811-5574

dr hab. inż. Izabela Skrzypczak, prof. uczelni²⁾

ORCID: 0000-0003-0978-3040

Multicriteria analysis for selecting priority roadwork locations in landslide-prone areas

Wielokryterialna analiza wyboru priorytetowych lokalizacji prac drogowych na terenach osuwiskowych

DOI: 10.15199/33.2025.09.24

Abstract. The aim of this study was to determine the priorities for road maintenance and reconstruction works at three landslide-prone locations in Tarnów district using a multi-criteria analysis method. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method was applied using different rating scales, taking into account geotechnical, geological, physiographic, and hydrological criteria. The results enabled the identification of the highest-risk location requiring priority in road planning. The AHP method proved to be an effective decision-support tool for engineering applications under conditions of limited data availability.

Keywords: landslide areas; multi-criteria analysis; roadworks.

Streszczenie. W artykule omówiono zagrożenia realizacji prac drogowo-remontowych w trzech lokalizacjach osuwiskowych na terenie powiatu tarnowskiego, z wykorzystaniem metody analizy wielokryterialnej. W badaniach zastosowano metodę AHP z wykorzystaniem różnych skal ocen, uwzględniając kryteria geotechniczne, geologiczne, fizjograficzne oraz hydrologiczne. Wyniki umożliwiły identyfikację obszaru o najwyższym poziomie ryzyka, który powinien zostać uwzględniony przy planowaniu inwestycji drogowych. Metoda AHP potwierdziła swoją użyteczność jako narzędzie wspomagania decyzji inżynierskich w warunkach ograniczonej dostępności danych.

Słowa kluczowe: tereny osuwiskowe; analiza wielokryterialna; roboty drogowe.

The progressive pace of civilizational development, combined with the limited availability of areas with favorable geotechnical conditions, has led to the increasing use of land exposed to geohazards, particularly those prone to mass movements. The highest intensification of landslide processes is observed in the Carpathian flysch zone, where unfavorable geological structure, fluctuating groundwater and precipitation levels affecting the physical and mechanical parameters of soils, as well as anthropogenic activities, contribute to the initiation and reactivation of landslides [1]. These phenomena pose a significant threat to road infrastructure, both from technical and economic perspectives. Losses associated with landslides and floods in Poland in 2010 were estimated at PLN 426 million [2]. To counteract the effects of mass movements, the Landslide Protection System (SOPO) was implemented in Poland, enabling identification, inventory, and monitoring of landslides [3]. Despite the availability of such tools, there is still a lack of unambiguous procedures supporting decision-making regarding the prioritization of actions in geohazard-prone areas.

This article discusses a multicriteria comparative analysis of three landslide-prone locations in Tarnów district using the AHP method. Its aim was to determine which of the locations – Janowice, Pleśna, or Wojnicz – should be recognized as a priority in the context of planning road maintenance and reconstruction works. The AHP method, commonly applied in foundation

Postępujący rozwój cywilizacyjny oraz ograniczona dostępność terenów o korzystnych warunkach geotechnicznych prowadzą do coraz częstszego zagospodarowywania obszarów narażonych na występowanie geozagrożeń, w tym szczególnie podatnych na ruchy masowe. Największą intensyfikację procesów osuwiskowych obserwuje się na obszarze fliszu Karpat, gdzie niekorzystna budowa geologiczna, zmienny poziom wód gruntowych i opadowych wpływający na parametry fizyczne i mechaniczne gruntów, a także działalność antropogeniczna, sprzyjają inicjacji i reaktywacji osuwisk [1]. Zjawiska te stanowią istotne zagrożenie infrastruktury drogowej, zarówno w aspekcie technicznym, jak i ekonomicznym. Straty związane z osuwiskami i powodzią w Polsce w 2010 r. oszacowano na 426 mln zł [2]. W celu przeciwdziałania skutkom ruchów masowych wdrożono w Polsce System Osłony Przeciwośuwiskowej (SOPO), umożliwiający identyfikację, inwentaryzację oraz monitoring osuwisk [3]. Mimo dostępności tego typu narzędzi, nadal brakuje jednoznacznych procedur wspierających podejmowanie decyzji dotyczących kolejności realizacji działań na terenach geozagrożonych.

W artykule omówiono wielokryterialną analizę porównawczą trzech lokalizacji osuwiskowych z powiatu tarnowskiego z zastosowaniem metody AHP. Jej celem było określenie, która z lokalizacji: Janowice, Pleśna czy Wojnicz powinna zostać uznana za priorytetową w kontekście planowania prac drogowo-remontowych. Metoda AHP, powszechnie stosowana w analizach warunków posadowienia oraz ocenie ryzyka geotechnicznego, umożliwia porównywanie wariantów przy ograniczonych danych ilościowych, uwzględniając jednocze-

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

^{*)} Correspondence address: agnieszka.lesniak@pk.edu.pl

condition analyses and geotechnical risk assessments, enables comparison of alternatives under conditions of limited quantitative data, while also incorporating expert judgments [4, 5]. The analysis results made it possible to identify the location with the highest level of risk, thereby providing important support for road managers and investors in rational planning of road maintenance and infrastructure projects.

Applied Research Methodology

To conduct a comparative analysis of landslide-prone locations in terms of the priority of planned infrastructure works, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method was applied. AHP is widely used in multicriteria decision-making processes [6, 7]. It enables the structuring of decision alternatives by evaluating them against a predefined set of criteria, established through pairwise comparisons (Figure 1).

The evaluation was based on complete documentation of field and laboratory investigations as well as expert knowledge. Each of the four groups of criteria – geotechnical, geological, physiographic, and hydrological – was described in detail based on geological-engineering documentation and data obtained from in-house investigations. Field observations and local monitoring system data were also considered.

The analysis concerned three locations in the Tarnów district: Janowice (A), Pleśna (B), and Wojnicz (C). The Tarnów district is situated primarily within the flysch zone of the Carpathian Foredeep, and thus lies in a potentially landslide-prone area. The main deposits forming the foredeep are Lower Carboniferous, Cretaceous, and Jurassic strata. The selected localities differ in their geotechnical, geological, physiographic, and hydrological conditions, which allows for their differentiated assessment within the framework of the AHP analysis.

• Janowice (Location A):

– geotechnical conditions: the substratum consists of loess-like clays and deluvial deposits, colluvial layers with interbedding of clay and sand occur, often of low bearing capacity, high groundwater level which may cause infiltration problems and waterlogging, especially during prolonged rainfall;

– geological conditions: the presence of slip surfaces negatively affects slope stability, the main geological layers are shales and sandstones which may be susceptible to mass movements due to water infiltration, high susceptibility to landslides resulting from the complex geological structure;

śnie oceny eksperckie [4, 5]. Wyniki analizy pozwoliły na wskazanie lokalizacji o najwyższym stopniu zagrożenia, co stanowi istotne wsparcie zarządców dróg i inwestorów w racjonalnym planowaniu prac remontowo-drogowych oraz projektów infrastrukturalnych.

Zastosowana metoda badań

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej lokalizacji osuwiskowych pod kątem priorytetowości planowanych działań infrastrukturalnych zastosowano metodę AHP (Analytic Hierarchy Process), powszechnie stosowaną w procesie wspomagania decyzji wielokryterialnych [6, 7]. Umożliwia ona hierarchizację wariantów decyzyjnych przez ich ocenę względem zestawu predefiniowanych kryteriów, określanych na podstawie porównań parami (rysunek 1).

Do oceny wykorzystano kompletną dokumentację badań terenowych i laboratoryjnych oraz wiedzę ekspercką. Każda z czterech grup kryteriów: gruntowe; geologiczne; fizjograficzne i hydrologiczne została szczegółowo opisana na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej oraz danych uzyskanych z badań własnych. W analizach, uwzględniono również obserwacje terenowe oraz dane z lokalnych systemów monitoringu.

Analiza dotyczyła trzech lokalizacji z terenu powiatu tarnowskiego: Janowic (A), Pleśnej (B) oraz Wojnicza (C). Powiat tarnowski znajduje się głównie w obszarze fliszu Zapadliska Przedkarpackiego, a więc na terenie potencjalnie osuwiskowym. Głównymi utworami budującymi zapadlisko są karbony dolne, kredowe i jurajskie. Wybrane miejscowości różnią się warunkami gruntowo-wodnymi, geologicznymi fizjograficznymi i hydrologicznymi, co pozwala na ich różnorodną ocenę w kontekście analizy AHP:

• Janowice (Lokalizacja A):

– warunki gruntowo-wodne: podłoże składa się z glin lesopodobnych oraz osadów deluwialnych, występują warstwy koluwalne z przewarstwieniami gliny i piasku, często o małej nośności, wysoki poziom wód gruntowych, który może powodować problemy z infiltracją i podtapianiem, szczególnie podczas długotrwałych opadów deszczu;

– warunki geologiczne: obecna powierzchnia poślizgu (powstała w wyniku wcześniejszych ruchów masowych) wpływa negatywnie na stabilność zboczy i stoków; główne warstwy geologiczne to łupki i piaskowce, które mogą być podatne na ruchy masowe w wyniku infiltracji wód; duża podatność na osuwiska ze względu na skomplikowaną budowę geologiczną;

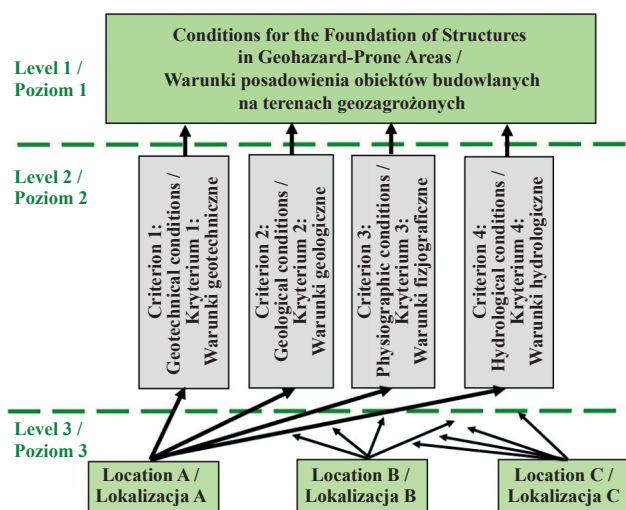


Fig. 1. Hierarchical structure of the considered decision-making process

Rys. 1. Struktura hierarchiczna rozważanego procesu decyzyjnego

- physiographic conditions: mountainous and hilly terrain with steep slopes, dominated by forests and thickets, river valleys which may be exposed to lateral erosion;

- hydrological conditions: dense network of streams and brooks which may influence local hydrological conditions, high retention of precipitation water due to the geological structure, presence of springs and groundwater outflows.

● **Pleśna (Location B):**

- geotechnical conditions: dominance of clayey and silty soils with varying degrees of plasticity, local variability in soil bearing capacity depending on lithological composition, moderate groundwater level with potential seasonal fluctuations, susceptibility to waterlogging in lower-lying areas;

- geological conditions: presence of bedrock layers mainly sandstones and shales which provide a stable substratum, potential landslide risk in areas with greater slope inclination;

- physiographic conditions: landscape dominated by moderately steep hills and valleys, predominance of agricultural and built-up areas in lowlands, scattered forested areas at higher elevations;

- hydrological conditions: presence of numerous small streams which may influence local hydrological conditions, variable soil permeability affecting local water retention conditions, potential problems with water erosion during intense rainfall.

● **Wojnicz (Location C):**

- geotechnical conditions: dominance of sandy and gravelly soils providing good permeability, low groundwater level minimizing the risk of waterlogging, soils with good bearing capacity suitable for construction;

- geological conditions: stable bedrock mainly sandstones and limestones providing high load-bearing capacity, low landslide risk due to stable geological conditions, local presence of loess deposits which may require specialized investigations;

- physiographic conditions: predominantly flat and gently undulating terrain, extensive agricultural and residential areas, occasional hills with slight slopes;

- hydrological conditions: good soil permeability facilitating natural drainage of precipitation water, stable hydrological conditions with low risk of waterlogging, presence of main rivers and their tributaries which are well managed hydrotechnically.

Thus, each of the localities included in the analysis exhibits unique geological and environmental conditions that affect the assessment of their suitability for various construction purposes. Janowice is characterized by a high landslide risk and elevated groundwater levels; Pleśna presents variable soil bearing capacity and a moderate landslide risk; whereas Wojnicz is distinguished by stable geotechnical conditions and low hydrological risk.

Within the applied AHP method, pairwise comparison matrices were constructed both for the main criteria and for the considered locations within each criterion. Subsequently, based on the determined values of local and global weights, the aggregated assessment of individual locations was calculated. To evaluate the impact of the type of rating scale on the analysis results, two scales were applied:

- warunki fizjograficzne: tereny górzyste i pagórkowate, o dużym nachyleniu stoków; przeważają lasy oraz zarośla i doliny rzeczne, które mogą być narażone na erozję boczną;

- warunki hydrologiczne: gęsta sieć potoków i strumieni, które mogą wpływać na lokalne warunki hydrologiczne; wysoka retencja wód opadowych w wyniku struktury geologicznej; obecność wysięków i źródeł wód podziemnych.

● **Pleśna (Lokalizacja B):**

- warunki gruntowo-wodne: dominacja gruntów gliniastych i ilastych, które mają różny stopień plastyczności; lokalna zmienność nośności gruntu w zależności od składu litologicznego; średni poziom wód gruntowych, z możliwością okresowych wahań w zależności od pory roku; skłonność do podtopień w niższej położonych obszarach;

- warunki geologiczne: obecność warstw skalnych, głównie piaskowce i łupki, które zapewniają stabilne podłoże; potencjalne ryzyko osuwisk w miejscach o większym nachyleniu terenu;

- warunki fizjograficzne: krajobraz zdominowany przez umiarkowanie strome wzgórza i doliny, przewaga terenów rolniczych i zabudowanych w nizinach, rozproszone obszary leśne na wyżej położonych terenach;

- warunki hydrologiczne: obecność licznych małych potoków, które mogą wpływać na lokalne warunki hydrologiczne, zmienna przepuszczalność gruntów, co wpływa na lokalne warunki retencji wód, potencjalne problemy z erozją wodną podczas intensywnych opadów.

● **Wojnicz (Lokalizacja C):**

- warunki gruntowo-wodne: dominacja gruntów piaszczystych i żwirowych, co zapewnia dobrą przepuszczalność; niski poziom wód gruntowych minimalizuje ryzyko podtopień; grunty o dobrej nośności, odpowiednie pod zabudowę;

- warunki geologiczne: stabilne podłoże skalne, głównie z piaskowców i wapieni, zapewniające dużą nośność; małe ryzyko osuwisk dzięki stabilnym warunkom geologicznym; lokalna obecność utworów lessowych, które mogą wymagać specjalistycznych badań;

- warunki fizjograficzne: przeważają tereny płaskie i lekko pagórkowate, duże obszary rolnicze i osiedlowe, sporadyczne wzniesienia o niewielkim nachyleniu;

- warunki hydrologiczne: dobra przepuszczalność gruntów, co sprzyja naturalnemu odprowadzaniu wód opadowych; stabilne warunki hydrologiczne z małym ryzykiem podtopień, obecność głównych rzek i ich dopływów, które są dobrze zarządzane hydrotechnicznie.

Każda z przyjętych do analiz miejscowości ma unikatowe uwarunkowania geologiczno-środowiskowe, które wpływają na ocenę ich przydatności do różnych celów budowlanych. Janowice charakteryzują się dużym ryzykiem osuwisk i wysokim poziomem wód gruntowych, Pleśna ma zmienną nośność gruntu i umiarkowane ryzyko osuwisk, natomiast Wojnicz cechują stabilne warunki geotechniczne i niskie ryzyko hydrologiczne.

W ramach zastosowanej metody AHP sporządzono macierze porównania parami zarówno głównych kryteriów, jak i rozważanych lokalizacji w obrębie każdego z kryteriów. Następnie, na podstawie wyznaczonych wartości wag lokalnych

- the full Saaty scale (9-point),
- the reduced scale (5-point).

The comparison of results obtained from both scales made it possible to determine their influence on the final ranking of locations. Based on the aggregated evaluations, it was possible to identify the location with the highest level of geohazard risk, and thus requiring priority in the planning of road maintenance and repair works in the considered landslide-prone areas.

The AHP Method

The AHP method, proposed by T. L. Saaty in the 1970s [6], underwent intensive theoretical and practical development, the detailed analysis of which was presented in [8]. Initially, publications by the method's author dominated, focusing on its mathematical foundations, e.g. [7]. In subsequent years, the method found applications in logistics, energy, health-care, and management. Since 2000, hybrid approaches have been developed, combining AHP with methods such as DEA, QFD, or TOPSIS, and extending it with fuzzy evaluations [9]. In construction, the AHP method has been applied, among others, in studies [10–12] to assess the sustainable selection of construction materials [10], the choice of measurement technique in the inventory of historic buildings [11], and for multicriteria comparative analysis of repair variants of a single-family residential building [12].

The evaluation process of the problem described in the article was carried out using pairwise comparison matrices in accordance with the classical AHP method developed by Saaty [6, 7]. The fundamental stages of the AHP method are as follows:

1) construction of a decision hierarchy, including the main goal, criteria i (optionally) sub-criteria, as well as decision alternatives;

2) creation of pairwise comparison matrices of criteria and/or alternatives with respect to a given criterion, in which the elements a_{ij} specify the relative dominance of element i over element j ; the values in the matrix are determined according to the Saaty scale (most commonly from 1 to 9) or its simplified versions (from 1 to 5);

3) calculation of the eigenvector of weights w , corresponding to the relative weights of the criteria (1):

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \quad (1)$$

where: A – pairwise comparison matrix,
 w – eigenvector of weights,
 $\lambda_{\max}$ – the maximum eigenvalue of the matrix.

4) normalization of the priority vector (Equation 2), so that the sum of all weights equals 1.0:

$$w_i^{norm} = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (2)$$

5) consistency assessment of the pairwise comparison matrix using the consistency index CI (3) and the consistency ratio CR (4):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \quad (3)$$

oraz globalnych, obliczono ocenę zagregowaną poszczególnych lokalizacji. W celu oceny wpływu rodzaju skali ocen na wyniki analizy zastosowano dwa rodzaje skal:

- pełną skalę Saaty'ego (9-stopniową);
- zredukowaną skalę (5-stopniową).

Porównanie wyników uzyskanych z obu skal pozwoliło określić ich wpływ na końcowy ranking lokalizacji. Na podstawie ocen zagregowanych możliwe było wskazanie lokalizacji o największym stopniu ryzyka geozagrożeń, a tym samym wymagającej pierwszeństwa w planowaniu robót remontowych i utrzymaniowo-naprawczych dróg na rozważanych terenach osuwiskowych.

Metoda AHP

Metoda AHP zaproponowana przez T. L. Saaty'ego w latach siedemdziesiątych XX wieku [6], przeszła intensywny rozwój teoretyczny i aplikacyjny, którego szczegółową analizę przedstawiono w [8]. Początkowo dominowały publikacje autora metody, koncentrujące się na jej podstawach matematycznych, np. [7]. W kolejnych latach metoda znalazła zastosowanie m.in. w logistyce, energetyce, ochronie zdrowia i zarządzaniu. Od 2000 r. rozwijano podejścia hybrydowe, łącząc AHP z metodami takimi jak DEA, QFD czy TOPSIS, a także rozszerzano ją o oceny rozmyte [9]. W budownictwie metodę AHP zastosowano m.in. w pracach [10–12] do oceny zrównoważonego wyboru materiałów budowlanych [10], wyboru techniki pomiarowej w inwentaryzacji obiektów zabytkowych [11] oraz do wielokryterialnej analizy porównawczej wariantów naprawy budynku jednorodzinne [12].

Proces oceny problemu opisanego w artykule przeprowadzono z zastosowaniem macierzy porównań parami zgodnie z klasyczną metodą AHP, opracowaną przez Saaty'ego [6, 7]. Podstawowe etapy metody AHP to:

1) budowa hierarchii decyzyjnej, obejmującej cel główny, kryteria i (opcjonalnie) podkryteria oraz alternatywy decyzyjne;

2) tworzenie macierzy porównań parami kryteriów i/lub alternatyw względem danego kryterium, w której elementy a_{ij} określają relatywną przewagę elementu i nad elementem j ; Wartości w macierzy ustalane są wg skali Saaty'ego (najczęściej od 1 do 9) lub jej uproszczonych wersji (od 1 do 5);

3) obliczenie wektora wag własnych w , odpowiadającego względnym wagom kryteriów (1):

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \quad (1)$$

gdzie: A – macierz porównań parami,
 w – wektor wag własnych,
 $\lambda_{\max}$ – największa wartość własna macierzy.

4) normalizacja wektora wag (wzór 2), tak aby suma wszystkich wag wynosiła 1,0:

$$w_i^{norm} = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (2)$$

5) ocena spójności macierzy porównań za pomocą wskaźnika niespójności CI (3) oraz wskaźnika spójności CR (4):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

where: CI – consistency index,
 RI – the random consistency index, the value of which depends on the size of the matrix n .

The consistency of the judgments was verified using the consistency index ($CI < 0.3$), and a consistency ratio ($CR < 0.1$) was considered acceptable.

6) Aggregation of weights for each alternative (e.g., location) according to Equation (5):

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i \quad (5)$$

where: W – aggregated weight (final score) of a given location,
 w_i – weight of the i -th main criterion (e.g., geological conditions),
 s_i – score of the location with respect to the i -th criterion,
 n – number of criteria analyzed.

In accordance with the outlined computational steps, the AHP method algorithm comprises six key activities:

- 1) definition of the problem and construction of the decision hierarchy;
- 2) creation of pairwise comparison matrices at all levels of the hierarchy;
- 3) calculation of weight vectors (normalized eigenvalues) for each matrix;
- 4) verification of inconsistency (CI) and consistency of assessments (CR); if $CI \geq 0.3$ or $CR \geq 0.1$ the evaluation process should be repeated;
- 5) calculation of the final (aggregated) weight of each alternative;
- 6) ranking of alternatives according to the values of aggregated weights.

The study also considered the influence of the applied rating scale: the full nine-point Saaty scale and the simplified five-point scale. Comparison of results obtained using both scales made it possible to assess the sensitivity of the AHP method to changes in the structure of expert judgments. A detailed description of the theoretical foundations of the method can be found, for example, in [13].

Research Results

As a result of the conducted analysis, aggregated weight values were calculated for the three considered locations: Janowice, Pleśna, and Wojnicz. These evaluations were obtained using both the full nine-point Saaty scale and the reduced five-point scale. The analysis took into account four main groups of criteria: geotechnical, geological, physiographic, and hydrological conditions. The weight values derived from pairwise comparison matrices of the main criteria and sub-criteria, applying both the full and reduced scales in accordance with the AHP method [6÷9], are presented in Tables 1 and 2.

Based on the full rating scale, the following aggregated values were obtained:

- Janowice (Location A): $0.556 \times 0.633 + 0.263 \times 0.107 + 0.122 \times 0.724 + 0.057 \times 0.633 = 0.506$;

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

gdzie: CI – wskaźnik niespójności,
 RI – wskaźnik losowej niespójności, którego wartość zależy od rozmiaru macierzy n .

Spójność ocen weryfikowana przy użyciu wskaźnika niespójności $CI < 0,3$ oraz spójności $CR < 0,1$ uznawana jest za akceptowalną.

6) agregacja wag każdej alternatywy (np. lokalizacji) wg wzoru (5):

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \cdot s_i \quad (5)$$

gdzie: W – waga zagregowana (ocena końcowa) danej lokalizacji;
 w_i – waga głównego kryterium i (np. warunki geologiczne);
 s_i – ocena lokalizacji względem kryterium i ;
 n – liczba analizowanych kryteriów.

Zgodnie z wyszczególnionymi etapami obliczeniowymi, algorytm metody AHP obejmuje sześć kluczowych działań:

- 1) zdefiniowanie problemu i zbudowanie hierarchii decyzyjnej;
- 2) utworzenie macierzy porównań parami w przypadkach wszystkich poziomów hierarchii;
- 3) obliczenie wektorów wag (znormalizowane wartości własne) w przypadku każdej macierzy;
- 4) sprawdzenie niespójności (CI) oraz spójności ocen (CR); jeżeli $CI \geq 0,3$ lub $CR \geq 0,1$ należy powtórzyć proces oceny;
- 5) obliczenie wagi końcowej (zagregowanej) każdego wariantu;
- 6) uszeregowanie wariantów wg wartości wag zagregowanych.

W badaniu uwzględniono również wpływ zastosowanej skali ocen: pełnej, dziewięciostopniowej skali Saaty'ego oraz uproszczonej skali pięciostopniowej. Porównanie wyników uzyskanych przy użyciu obu skal umożliwiło ocenę wrażliwości metody AHP na zmiany w strukturze ocen eksperckich. Szczegółowy opis teoretycznych podstaw metody można znaleźć m.in. w pracy [13].

Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonej analizy obliczono wartości wag zagregowanych dotyczące trzech rozpatrywanych lokalizacji: Janowice, Pleśnej i Wojnicza. Oceny te uzyskano przy wykorzystaniu zarówno pełnej, dziewięciostopniowej skali Saaty'ego, jak i zredukowanej, pięciostopniowej skali ocen. W analizie uwzględniono cztery główne grupy kryteriów: warunki geotechniczne; geologiczne; fizjograficzne oraz hydrologiczne. Wartości wag otrzymane z macierzy porównań parami i kryteriów głównych oraz podkryteriów z zastosowaniem pełnej oraz zredukowanej skali, zgodnie z metodą AHP [6÷9] pokazano w tabelach 1 i 2.

Na podstawie pełnej skali ocen uzyskano następujące wartości zagregowane:

- Janowice (Lokalizacja A): $0.556 \times 0.633 + 0.263 \times 0.107 + 0.122 \times 0.724 + 0.057 \times 0.633 = 0.506$;

Table 1. Weights of main criteria and sub-criteria for the considered locations using the full Saaty scale

Tabela 1. Wagi kryteriów głównych oraz podkryteriów w przypadku rozważanych lokalizacji z zastosowaniem pełnej skali Saaty'ego

Sub-criterion: location / Podkryterium lokalizacja	Main criteria / Kryteria główne			
	geotechnical conditions / warunki geotechniczne	geological conditions / warunki geologiczne	physiographic conditions / warunki fizjograficzne	hydrological conditions / warunki hydrologiczne
	0.556	0.263	0.122	0.057
Janowice (Location A / Lokalizacja A)	0.633	0.107	0.724	0.633
Pleśna (Location B / Lokalizacja B)	0.260	0.260	0.193	0.260
Wojnicz (Location C / Lokalizacja C)	0.107	0.633	0.083	0.107

Table 2. Weights of main criteria and sub-criteria for the considered locations using the reduced Saaty scale

Tabela 2. Wagi kryteriów głównych oraz podkryteriów w przypadku rozważanych lokalizacji z zastosowaniem zredukowanej skali Saaty'ego

Sub-criterion: location / Podkryterium lokalizacja	Main criteria / Kryteria główne			
	geotechnical conditions / warunki geotechniczne	geological conditions / warunki geologiczne	physiographic conditions / warunki fizjograficzne	hydrological conditions / warunki hydrologiczne
	0.542	0.233	0.085	0.140
Janowice (Location A / Lokalizacja A)	0.623	0.126	0.665	0.632
Pleśna (Location B / Lokalizacja B)	0.239	0.416	0.231	0.239
Wojnicz (Location C / Lokalizacja C)	0.137	0.458	0.104	0.137

• Pleśna (Location B): $0.556 \times 0.260 + 0.263 \times 0.260 + 0.122 \times 0.193 + 0.057 \times 0.260 = 0.252$;

• Wojnicz (Location C): $0.556 \times 0.107 + 0.263 \times 0.633 + 0.122 \times 0.083 + 0.057 \times 0.107 = 0.242$;

Using the reduced scale, similar results were obtained:

• Janowice (Location A): $0.542 \times 0.623 + 0.233 \times 0.126 + 0.085 \times 0.665 + 0.140 \times 0.623 = 0.511$;

• Pleśna (Location B): $0.542 \times 0.239 + 0.233 \times 0.416 + 0.085 \times 0.231 + 0.140 \times 0.239 = 0.280$;

• Wojnicz (Location C): $0.542 \times 0.137 + 0.233 \times 0.458 + 0.085 \times 0.104 + 0.140 \times 0.137 = 0.209$.

The Janowice location achieved the highest aggregated assessment values in both cases, which indicates the highest level of geotechnical risk (Figure 2). This location should therefore be considered a priority in the context of planning roadworks and the protection of road infrastructure. The consistency of the ranking of locations regardless of the applied rating scale demonstrates the stability and robustness of the AHP method with respect to modifications of the comparison scale, although differences in numerical values suggest a potential influence of the scale on the level of detail of the results (Figure 2).

The application of both the full and reduced rating scales in the AHP method results in obtaining an identical ranking of locations, which confirms the stability of the method with respect to the choice of scale. At the same time, the observable differences in aggregated values suggest that the type of scale may influence the precision of the results in more complex analyses or in cases involving

• Pleśna (Lokalizacja B): $0.556 \times 0.260 + 0.263 \times 0.260 + 0.122 \times 0.193 + 0.057 \times 0.260 = 0.252$;

• Wojnicz (Lokalizacja C): $0.556 \times 0.107 + 0.263 \times 0.633 + 0.122 \times 0.083 + 0.057 \times 0.107 = 0.242$.

Z zastosowaniem skali zredukowanej uzyskano zbliżone wyniki:

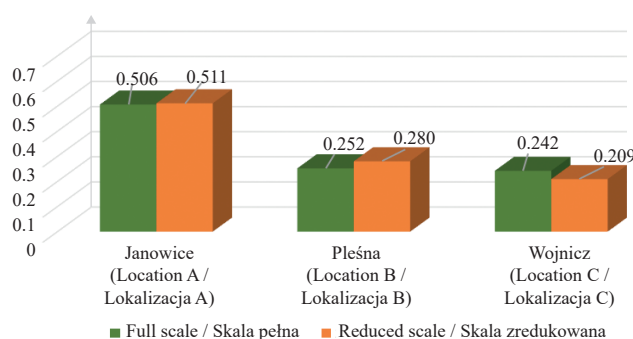
• Janowice (Lokalizacja A): $0.542 \times 0.623 + 0.233 \times 0.126 + 0.085 \times 0.665 + 0.140 \times 0.623 = 0.511$;

• Pleśna (Lokalizacja B): $0.542 \times 0.239 + 0.233 \times 0.416 + 0.085 \times 0.231 + 0.140 \times 0.239 = 0.280$;

• Wojnicz (Lokalizacja C): $0.542 \times 0.137 + 0.233 \times 0.458 + 0.085 \times 0.104 + 0.140 \times 0.137 = 0.209$.

Lokalizacja Janowice uzyskała największe wartości ocen zagregowanych w obu przypadkach, co wskazuje na najwyższy poziom ryzyka geotechnicznego (rysunek 2). Lokalizacja ta powinna być uznana za priorytetową w kontekście planowania robót drogowych i zabezpieczeń infrastruktury drogowej. Zgodność kolejności lokalizacji niezależnie od zastosowanej skali ocen wskazuje na stabilność i odporność metody AHP na modyfikacje skali porównań, choć różnice w wartościach liczbowych sugerują potencjalny wpływ skali na szczegółowość wyników (rysunek 2).

Zastosowanie pełnej i zredukowanej skali ocen w metodzie AHP skutkuje uzyskaniem identycznego rankingu lokalizacji, co potwierdza stabilność metody względem doboru skali ocen. Jednocześnie zauważalne różnice wartości zagregowanych sugerują, że typ skali może wpływać na precyzję uzyskiwanych wyników w bardziej złożonych analizach lub przy

**Fig. 2. Aggregated assessment obtained for the selected locations based on the AHP method**

Rys. 2. Ocena zagregowana uzyskana w przypadku wybranych lokalizacji na podstawie metody AHP

ambiguous input data. The research findings provide the basis for identifying the location that should be treated as a priority in the planning of maintenance and repair activities aimed at protection against landslides.

Summary

The article presented a multicriteria assessment of three landslide-prone locations in the Tarnów district, aimed at determining the hierarchy of implementing road maintenance works. The application of the AHP method made it possible to carry out an objective analysis that considered multiple groups of decision criteria and their mutual weight relationships. The analysis, conducted with two different rating scales, demonstrated consistency in the final ranking of locations, which confirms the robustness of the AHP method to variations in the level of detail of expert assessments.

Based on the obtained results, it was concluded that the Janowice location is characterized by the highest level of geohazard risk and should be recognized as a priority in the context of planning maintenance and repair works aimed at protecting road infrastructure from the effects of mass movements.

The AHP method proved to be an effective engineering decision-support tool. The study results confirm that AHP can be successfully applied in engineering practice as an efficient method supporting the process of planning road investments in landslide-prone areas. It enables the execution of a multi-aspect, structured, and transparent evaluation, facilitating infrastructure managers in establishing the order of implementation of road maintenance works.

niejednoznacznych danych wejściowych. Wyniki badań stanowią podstawę do wskazania lokalizacji, która powinna być traktowana jako priorytetowa w planowaniu działań remontowych i utrzymaniowo-naprawczych w celu zabezpieczenia przed osuwiskami.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wielokryterialną ocenę trzech lokalizacji osuwiskowych na terenie powiatu tarnowskiego, mającą na celu określenie hierarchii realizacji prac remontowo-drogowych. Zastosowanie metody AHP umożliwiło przeprowadzenie obiektywnej analizy z uwzględnieniem wielu grup kryteriów decyzyjnych oraz ich wzajemnych relacji wagowych. Przeprowadzona analiza, wykorzystująca dwie różne skale ocen, wykazała spójność końcowego rankingu lokalizacji, co potwierdza odporność metody AHP na zmienność poziomu szczegółowości ocen eksperckich.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że lokalizacja Janowice charakteryzuje się najwyższym poziomem ryzyka geozagrożeń i powinna zostać uznana za priorytetową w kontekście planowania prac remontowych oraz utrzymaniowo-naprawczych, ukierunkowanych na zabezpieczenie infrastruktury drogowej przed skutkami ruchów masowych.

Metoda AHP okazała się efektywnym narzędziem wspomagania decyzji inżynierskich. Wyniki badań potwierdzają, że AHP może być z powodzeniem wykorzystywana w praktyce inżynierskiej jako skuteczna metoda wspierająca proces planowania inwestycji drogowych na terenach osuwiskowych. Umożliwia ona przeprowadzenie wieloaspektowej, ustrukturyzowanej i transparentnej oceny, ułatwiającej zarządom infrastruktury ustalanie kolejności realizacji prac remontowych.

Received: 17.04.2025

Revised: 12.06.2025

Published: 19.09.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 17.04.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 12.06.2025 r.

Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literature

- [1] Skrzypczak I, Kokoszka W, Rojowski R, Kogut J. Zagrożenia infrastruktury komunikacyjnej na terenach osuwiskowych i zalewowych. *Technika Transportu Szynowego – TTS*. 2015; 12: 1385-1390.
- [2] Gdzie występują osuwiska w Polsce? – Ministerstwo Klimatu i Środowiska – Portal Gov.pl (www.gov.pl); <https://www.gov.pl/web/klimat/gdzie-wystepuja-osuwiska-w-polsce#:~:text=Prace%2C,dostep:maj%2024>.
- [3] Osuwiska – ciągle zagrożenie, <https://www.pgi.gov.pl/aktualnosci/display/9855-osuwiska-ciagle-zagrozenie.html>, dostęp: maj 2024.
- [4] Li D, Liao F, Wang L, Lin J, Wang J. Multi-Stage and Multi-Parameter Influence Analysis of Deep Foundation Pit Excavation on Surrounding Environment. *Buildings*. 2024; 14(1): 297. <https://doi.org/10.3390/buildings14010297>.
- [5] Jermolowicz P. Sposoby zabezpieczania osuwisk – cz. II. *Inżynier Budownictwa*. 2018; 1: 70-74.
- [6] Saaty TL. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*. 1986; 32: 841-855.
- [7] Saaty TL, Vargas LG. Uncertainty and Rank Order in the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 1987; 32: 107-117.
- [8] Emrouznejad A, Marra M. The state of the art development of AHP

- (1979–2017): A literature review with a social network analysis. *International Journal of Production Research*. 2017; 55(22), 6653-6675. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1334976>.
- [9] Mikhailov L. Deriving Priorities from Fuzzy Pairwise Comparison Judgements. *Fuzzy Sets and Systems*. 2003; 134(3): 365-385. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(02\)00383-4](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(02)00383-4).
- [10] Figueiredo K, Pierott R, Hammad AW, Haddad A. Sustainable material choice for construction projects: A Life Cycle Sustainability Assessment framework based on BIM and Fuzzy-AHP. *Building and Environment*, 2021; 196: 107805. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107805>.
- [11] Skrzypczak I, Leśniak A. Wybór metody pomiarowej do inwentaryzacji obiektu zabytkowego z zastosowaniem AHP. *Materiały Budowlane*. 2022; 11 (603): 106-108. <https://doi.org/10.15199/33.2022.11.29>.
- [12] Dziadosz A, Baczyński K, Rejment M, Wiecek D. Wielokryterialna analiza porównawcza wybranych rozwiązań naprawczych jednorodzinego budynku mieszkalnego. *Materiały Budowlane*. 2022; 10 (602): 49-52. <https://doi.org/10.15199/33.2016.12.19>.
- [13] Prusak A, Stefanów P. AHP – analityczny proces hierarchiczny. *Budowa i analiza modeli decyzyjnych krok po kroku*. Wydawnictwo C.H. Beck, 2014.