



**MARCIN BILSKI**<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0002-1445-5749

**ANNA MAŁEK**<sup>2)</sup>  
ORCID: 0000-0002-2960-0902

**MICHAŁ KAISER**<sup>3)</sup>

## RAILWAY LEVEL CROSSING TRAFFIC SAFETY BASED ON ECONOMIC-TECHNICAL ANALYSIS AND PHOTOGRAMMETRIC METHOD

## BEZPIECZEŃSTWO RUCHU NA PRZEJAZDACH KOLEJOWO-DROGOWYCH NA PODSTAWIE ANALIZY EKONOMICZNO-TECHNICZNEJ I METODY FOTOGRAMETRYCZNEJ

**STRESZCZENIE.** W artykule scharakteryzowano przejazdy kolejowo-drogowe pod względem rodzaju urządzeń zabezpieczających ruch oraz przedstawiono nawierzchnie drogowe występujące na nich. Wykonano analizę kosztów zastosowania poszczególnych rozwiązań zabezpieczenia ruchu oraz typów konstrukcji nawierzchni drogowej na przejazdach kolejowo-drogowych w celu określenia najbardziej pożądanego rozwiązania pod względem bezpieczeństwa i komfortu ruchu. Wyniki analiz wykazały, że koszty budowy różnego typu urządzeń zabezpieczenia ruchu dla przejazdów kolejowo-drogowych w ujęciu globalnym są zbliżone ze względu na bardzo duże nakłady finansowe potrzebne do ich montażu, natomiast różnice w kosztach wykonania konstrukcji nawierzchni drogowej przejazdów wynoszą do 40% w zależności od wybranego rozwiązania technologicznego. W ostatniej części artykułu przedstawiono metodę oceny widoczności na przejazdach kolejowo-drogowych przy zastosowaniu bezzałogowego statku powietrznego. Przedstawiona metoda ze względu na dokładność i łatwość zastosowania może stanowić alternatywę dla klasycznych rozwiązań wykorzystujących przykładowo magnetyczną (z tarczką lub bez) wraz z taśmą pomiarową, dalmierzem laserowym lub tachimetrem.

**SŁOWA KLUCZOWE:** bezpieczeństwo ruchu kolejowo-drogowego, bezzałogowy statek powietrzny, chmura punktów, fotogrametria, przejazd kolejowo-drogowy, widoczność na przejeździe kolejowo-drogowym.

**ABSTRACT.** The article characterizes railway-road level crossings in terms of safety measures and pavement types used. Cost analysis of various level crossing safety devices and pavement types was conducted in order to determine the most advantageous solutions in terms of safety and ride quality. The results indicate that construction costs of various traffic safety devices on level crossings are generally similar due to the considerable financial expenditures required; differences in the costs of level crossing pavements reach 40%, depending on the chosen technological solution. The final section of the article presents a method for evaluation of visibility at level crossings using an unmanned aerial vehicle. Owing to its accuracy and ease of application, the presented method may serve as an alternative to typical solutions which involve the use of a magnetic measuring square (with or without target plates) in combination with a measuring tape, a laser distance meter or a total station.

**KEYWORDS:** dense cloud, photogrammetry, railway level crossing, railway-road traffic safety, unmanned aerial vehicle, visibility at railway level crossing.

DOI: 10.7409/rabdim.024.011

<sup>1)</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, ul. Piotrowo 5, 61-139 Poznań; marcin.bilski@put.poznan.pl (✉)

<sup>2)</sup> Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, ul. Piotrowo 5, 61-139 Poznań; anna.malek@put.poznan.pl

<sup>3)</sup> Torpol S.A., ul. Świętego Michała 43, 61-119 Poznań; m.kaiser@torpol.pl

## 1. WPROWADZENIE

W Polsce zgodnie z danymi przedstawionymi w [1] przez Urząd Transportu Kolejowego (UTK) łączna liczba jedno-poziomowych skrzyżowań kolejowo-drogowych na czynnych eksploatowanych liniach kolejowych w 2022 r. wynosiła nieznacznie ponad 12 tysięcy. Niestety z tej liczby aż 43% stanowią przejazdy kolejowo-drogowe, które nie są wyposażone w żadne systemy i urządzenia zabezpieczenia ruchu (wg Polskich warunków prawnych [2] są to przejazdy zaliczane do tzw. kategorii D). Na tle danych z 2020 r. z krajów Unii Europejskiej, które przedstawiono na Rys. 1, Polska według danych z 2022 r. [1] mieści się w średniej Europejskiej wynoszącej około 45% przy łącznej liczbie przejazdów kolejowo-drogowych równej około 109 000 w 28 analizowanych krajach (wg danych z 2020 r. [3] liczba przejazdów kategorii D wynosiła około 55% w Polsce). Najmniej przejazdów kolejowo-drogowych nie posiadających żadnych systemów zabezpieczenia ruchu w Europie występuje w Szwajcarii (około 10%), a najwięcej w Norwegii (około 85%) [3]. Według raportu [4] UTK z 2023 roku aż 35,0% wszystkich wypadków odnotowanych na liniach kolejowych w Polsce w roku 2022 stanowiły zdarzenia występujące na przejazdach i przejściach kolejowo-drogowych. Wraz z najechnaniem przez pociąg na osobę lub pojazd poza przejazdem/przejściem (34,2%) są to najczęstsze przyczyny wypadków na liniach kolejowych w Polsce. Porównując powyższe wyniki ze statystykami dla krajów Unii Europejskiej można zauważyć, że stanowi to poważny problem związany z bezpieczeństwem ruchu w obrębie infrastruktury kolejowej nie tylko w Polsce, ale i w większości państw na kontynencie Europejskim. Według statystyk Unii Europejskiej z 2021 r. [3] ofiary śmiertelne na przejazdach kolejowo-drogowych stanowiły około 29% wszystkich ofiar śmiertelnych wypadków kolejowych w Europie, co czyni wypadki na przejazdach drugą co do wielkości przyczyną zgonów, po najechnaniu przez pociąg na osobę lub pojazd poza przejazdem/przejściem (około 62%). Z tego względu zwiększenie bezpieczeństwa na przejazdach kolejowo-drogowych stanowi jeden z priorytetów nie tylko dla Polskich Kolei Państwowych (PKP), ale i dla Unii Europejskiej. Na sieci kolejowej w Polsce prowadzony jest między innymi ciągły proces modernizacji infrastruktury poprzez wprowadzanie nowych rozwiązań technologicznych na przejazdach kolejowo-drogowych. Dodatkowo, w celu zwiększenia bezpieczeństwa, PKP

## 1. INTRODUCTION

According to the data published by the Polish Office of Rail Transport [1], the total number of railway-road level crossings on in-service railway lines in 2022 was slightly over 12 thousand. However, passive level crossings without any traffic safety systems or devices make up as much as 43% of the total number (in Polish legislation such passive crossings are classified as “category D” [2]). Upon comparison with the 2020 data from the European Union countries shown in Fig. 1, Polish data from 2022 [1] indicate that the Polish proportion of passive crossings is similar to the EU average, which is approx. 45% for the total of around 109 thousand level crossings in the analyzed 28 countries (according to the 2020 European data [3], the share of category D crossings in Poland was around 55% in 2020). Country with the lowest share of level crossings without any traffic safety systems in the EU is Switzerland (around 10%), while the country with the greatest share is Norway (around 85%) [3]. According to the report published in 2023 by the Polish Office of Rail Transport [4], accidents at level crossings (including pedestrian crossings) comprised as much as 35.0% of all accidents on railways in Poland in 2022. Beside train collisions with people/vehicles on railway segments outside of any crossings (34.2%), they constitute the most frequent types of railway accidents in Poland. Comparisons of the above results with statistics from other EU countries indicate that such accidents pose a serious problem in terms of traffic safety on railway infrastructure, not only in Poland, but in most European countries. According to the EU statistics from 2021 [3], fatalities at road-railway crossings comprised around 29% of all fatalities on railways in Europe, which makes accidents at crossings the second most frequent cause of fatalities, after train collisions with people/vehicles on railway segments outside of any crossings (around 62%). Therefore, improvement of safety at level crossings belongs to the priorities not only for the Polish National Railways (PKP), but for the entire European Union. Railway network in Poland is being subjected to ongoing infrastructural modernization, which includes introduction of new technological solutions at level crossings. Additionally, in order to improve safety, PKP has been running public awareness projects, aimed at educating road users on the threats arising from road-railway traffic violations. Unfortunately, despite numerous initiatives aimed at improvement of level crossing

proceeds with social education actions, aiming to increase awareness of users about risks resulting from non-compliance with railway-road traffic rules. Unfortunately, despite many initiatives aimed at improving safety at railway-road crossings in Poland, analysis of research results from 2008-2018 [5] indicates that the number of fatal accidents on this type of infrastructure does not decrease.

safety in Poland, research results from 2008-2018 [5] indicate that the number of fatalities on such infrastructure does not decrease.

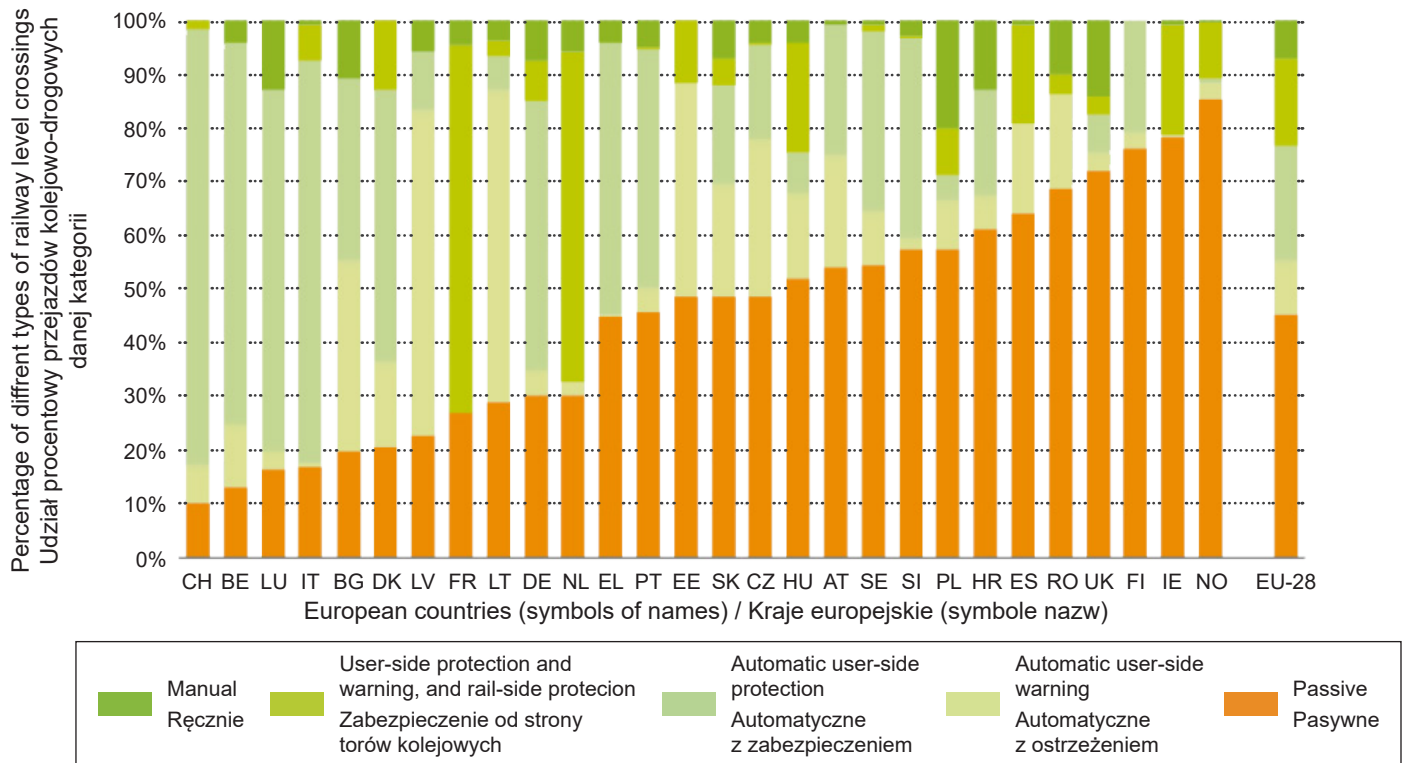


Fig. 1. Percentage of different types of railway level crossings in 28 European countries in 2020 [3]

Rys. 1. Udział procentowy przejazdów kolejowo-drogowych danej kategorii w 28 krajach europejskich w 2020 r. [3]

## 2. CEL I ZAKRES PRACY

In this article, at the beginning, technical solutions related to traffic safety systems and pavement structures used at road-railway level crossings are presented. As indicated by the statistics [1, 3], the level of fatal accidents at level crossings in Europe and Poland is high and constitutes about 30% of all fatal accidents occurring on railway lines. Reducing the number of fatal accidents on this type of infrastructure is a priority for transport system administrators across Europe and Poland. In order to identify the most advantageous solutions in economic terms, a construction cost analysis was performed for technical solutions related to traffic safety and ride quality on road-railway crossings. Construction

## 2. THE AIM AND SCOPE OF THE WORK

This article includes presentation of technical solutions of traffic safety systems and pavement structures used at road-railway level crossings. As indicated by the statistics [1, 3], level of fatalities at level crossings in Europe (including Poland) is high, comprising about 30% of all fatalities on railway lines. Limiting the number of fatalities on such infrastructure belongs to the priorities of transport system administrators across Europe and Poland. In order to identify the most advantageous solutions in economic terms, construction cost analysis was performed for technical solutions related to traffic safety and ride quality on road-railway crossings. Construction

przeprowadzono analizę kosztów budowy rozwiązań technicznych związanych z bezpieczeństwem oraz komfortem ruchu na przejazdach kolejowo-drogowych. Na podstawie danych z kosztorysów inwestorskich z lat 2020-2022 związanych z budową lub przebudową przejazdów kolejowo-drogowych (linia kolejowa dwutorowa oraz jednojezdniowa dwupasowa droga dla pojazdów samochodowych) kategorii A (2 szt.), kategorii B (4 szt.) i kategorii C (4 szt.) oszacowano koszty wykonania poszczególnych systemów związanych z bezpieczeństwem ruchu dla danej kategorii. Oszacowanie kosztów budowy nawierzchni przejazdu kolejowo-drogowego wykonano na podstawie kosztów jednostkowych z 20 kosztorysów inwestorskich z roku 2022 dotyczących wykonania nawierzchni z płyt wielkogabarytowych (10 szt.), płyt małogabarytowych (6 szt.), płyt gumowych (2 szt.) i bezpodsypekowych płyt przejazdowych (2 szt.). Przyjęte średnie koszty jednostkowe z powyższych kosztorysów wykorzystano do określenia kosztów zabudowy przejazdu kolejowo-drogowego o szerokości 6 m na linii dwutorowej w przypadku każdego z czterech rozwiązań konstrukcyjnych wpływających na komfort ruchu pojazdów samochodowych. Dodatkowo wykonano ocenę metody sprawdzania warunków widoczności na przejazdach kolejowo-drogowych przy zastosowaniu fotogrametrii i bezzałogowego statku powietrznego (BSP), która może stanowić prosty i szybki sposób kontroli bezpieczeństwa ruchu na tego typu infrastrukturze. Przedstawiona metoda może stanowić alternatywę dla zastosowania przykładnicy magnetycznej (z tarczką lub bez) wraz z taśmą pomiarową, dalmierzem laserowym lub tachimetrem.

### 3. PRZEJAZDY KOLEJOWO-DROGOWE W POLSCE I ICH CHARAKTERYSTYKA

Szczegółowe zasady związane z usytuowaniem i użytkowaniem przejazdów kolejowo-drogowych w Polsce zawarte są w warunkach technicznych [2], stanowiących rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z 2015 r. Wymagania przedstawione w [2] są również zgodne z dyrektywą [6] Unii Europejskiej nr 2014/88 z 2014 r. Definiują one przejazd kolejowo-drogowy jako jednopoziomowe skrzyżowanie toru kolejowego z drogą publiczną na liniach kolejowych i bocznicach kolejowych, na których ruch kolejowy jest prowadzony z prędkością nie większą niż 160 km/h. Zgodnie z warunkami

costs of specific traffic safety systems were evaluated based on investor cost estimates from 2020-2022 pertaining to construction or reconstruction of level crossings (a single carriageway road with two lanes crossing a two-track railway line) in category A (2 pcs.), category B (4 pcs.) and category C (4 pcs.). Pavement construction costs were evaluated based on unit costs given in 20 investor cost estimates from 2022 pertaining to construction of crossing pavement structures from large reinforced concrete slabs (10 pcs.), small reinforced concrete slabs (6 pcs.), rubber slabs (2 pcs.) and ballastless crossing slabs (2 pcs.). The adopted average unit costs from the above estimates were used for determination of the total costs of four different pavement solutions at a 6-m-wide crossing across a two-track railway line. Additionally, a method for verification of visibility at level crossings using an unmanned aerial vehicle (UAV) and photogrammetry is evaluated in the article. The method may enable accurate and easy verification of safety on such infrastructure. The presented method may serve as an alternative to the use of a magnetic measuring square (with or without target plates) in combination with a measuring tape, a laser distance meter or a total station.

### 3. ROAD-RAILWAY CROSSINGS IN POLAND AND THEIR CHARACTERISTICS

Detailed principles governing location and exploitation of road-railway crossings in Poland are given in the technical requirements [2], which were issued as the regulation of the Minister of Infrastructure and Development in 2015. Requirements presented in [2] are in line with the 2014 European Union Directive 2014/88 [6]. They define road-railway crossing as a single-level intersection of a railway track and a public road on railway lines and sidings, whereas rail traffic speed in such locations is not to exceed 160 km/h. According to the technical requirements [2] and the directive [6], road-railway crossings are divided into several categories:

- A (classified as manual) – level crossings at which road traffic is controlled:
  - by qualified and authorized employees of rail administration or rail operator,
  - by means of manual light signals or crossing systems/devices equipped with full barriers;

technicznymi [2] i dyrektywą [6] przejazdy i przejścia kolejowo-drogowe dzieli się na kategorie:

- A (klasyfikowane jako ręczne) – przejazdy kolejowo-drogowe, na których ruch drogowy jest kierowany:
  - przez uprawnionych pracowników zarządcy kolei lub przewoźnika kolejowego, posiadających wymagane kwalifikacje,
  - przy pomocy sygnałów ręcznych albo systemów lub urządzeń przejazdowych wyposażonych w rogatki zamykające całą szerokość jezdni;
- B (klasyfikowane jako automatyczne z zabezpieczeniem) – przejazdy kolejowo-drogowe, na których ruch drogowy jest kierowany przy pomocy samoczynnych systemów przejazdowych, wyposażonych w sygnalizację świetlną i rogatki zamykające ruch drogowy w kierunku wjazdu na przejazd albo wjazdu na przejazd i zjazdu z przejazdu;
- C (klasyfikowane jako automatyczne z ostrzeżeniem) – przejazdy kolejowo-drogowe, na których ruch drogowy jest kierowany przy pomocy samoczynnych systemów przejazdowych wyposażonych tylko w sygnalizację świetlną (Rys. 2);
- D (klasyfikowane jako pasywne) – przejazdy kolejowo-drogowe, które nie są wyposażone w systemy i urządzenia zabezpieczenia ruchu;
- E – przejścia wyposażone w półsamoczynne lub samoczynne systemy przejazdowe albo kołowrotki, barierki lub labirynty;
- F (klasyfikowane jako zabezpieczenia od strony torów kolejowych) – przejazdy kolejowo-drogowe lub przejścia zlokalizowane na drogach wewnętrznych; wyposażone w rogatki stale zamknięte, otwierane w razie potrzeby przez użytkowników, lub wyposażone zgodnie z warunkami technicznymi określonymi dla kategorii A albo B.

W Polsce, oprócz rodzaju systemu zabezpieczeń lub jego braku, na przynależność danego przejazdu drogowo-kolejowego do wybranej kategorii ma również wpływ natężenie ruchu pojazdów samochodowych i pociągów [2]. W zależności od kategorii przejazdu można wyróżnić różne warianty i sposoby wykonania zabezpieczeń technicznych ruchu pojazdów samochodowych, rowerów i pieszych. Mogą to być np. napędy rogatkowe z drągami zamykającymi całą szerokość drogi (ze światłami na drągach

- B (classified as automatic with protection) – level crossings at which road traffic is controlled by means of automatic systems equipped with light signals and half barriers or full barriers;
- C (classified as automatic with warning) – level crossings at which road traffic is controlled by means of automatic systems equipped with light signals only (Fig. 2);
- D (classified as passive) – level crossings that are not equipped with any traffic safety systems or devices;
- E – foot crossings equipped with semi-automatic or automatic systems or swing gates, barriers or zig-zag fencing;
- F (classified as train-side protected) – level road-railway or footpath-railway crossings located on private roads; equipped with closed barriers that have to be operated by the users as needed, or equipped according to technical requirements determined for categories A or B.



Fig. 2. Railway level crossing with an automatic user-side warning (category C) with pavement made of large-size reinforced concrete crossing slabs

Rys. 2. Przejazd kolejowo-drogowy z systemem automatycznym z ostrzeżeniem (kategoria C) z nawierzchnią drogową z płyt przejazdowych wielkogabarytowych

In Poland, apart from the type of safety devices or their lack, classification of a given crossing is also affected by the volume of road and rail traffic [2]. Depending on the category of the crossing, various versions and forms of technical protection of vehicles, cyclists and pedestrians may be used. For example, full barriers may be installed with or without lamps mounted on the barrier

rogatkowych lub bez; z sygnalizatorem akustycznym lub bez). Zróznicowanie zabezpieczeń przejazdów kolejowo-drogowych odnosi się również do wyglądu (formy zewnętrznej urządzeń zabezpieczających); istnieją sygnalizatory jedno- lub dwukomorowe, stosowana jest różna szerokość pasów białoczerwonych na drogach rogatek w zależności od sposobu ich obsługi oraz sekwencji pracy poszczególnych urządzeń zabezpieczających w procesie zamykania przejazdu kolejowo-drogowego [7]. Dla przykładu systemy zabezpieczenia przejazdów kolejowo-drogowych kategorii A są wyposażone w: nastawniki sterująco-kontrolne, napędy rogatkowe, drągi rogatkowe wraz z latarkami oraz sygnalizatory drogowe i tarcze ostrzegawcze przejazdowe. Systemy te mają możliwość powiązania z urządzeniami stacjami wykonanymi w technologii przekątnikowej i komputerowej. Natomiast do zabezpieczania przejazdów kolejowo-drogowych kategorii B i C (o maksymalnie czterech torach) wykorzystuje się samoczynne sygnalizacje przejazdowe (automatyczna obsługa urządzeń zabezpieczających ruch). Systemy tego typu są wyposażone w układ powiązań z urządzeniami stacjami na zasadzie uzależnienia wskazań semaforów wyjazdowych i wjazdowych od stanu urządzeń samoczynnej sygnalizacji przejazdowej. Działanie urządzeń jest nadzorowane przez urządzenie zdalnej kontroli, które stanowi nadrzędny sterownik [8-10]. Podsumowując, kategoria przejazdu kolejowo-drogowego oraz wybór sposobu zabezpieczenia technicznego wpływa na koszty jego budowy i późniejszego utrzymania.

Przejazdy kolejowo-drogowe mogą różnić się nie tylko systemami zabezpieczenia ruchu, ale też rodzajem konstrukcji nawierzchni drogowej. Na rynku dostępnych jest wiele rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystywanych przy budowie nawierzchni przejazdów kolejowo-drogowych. W niniejszym artykule analizie poddano rozwiązania wykorzystywane w Polsce. Na przejazdach kolejowo-drogowych stosowane są m.in. betonowe płyty przejazdowe wielkogabarytowe (Rys. 2), betonowe płyty przejazdowe małogabarytowe, nawierzchnie gumowe (Rys. 3), czy płyty przejazdowe do rozwiązań bezpodsytkowych. Obecnie oprócz ceny konstrukcji przejazdu kolejowo-drogowego pod uwagę brane są takie aspekty jak np. generowanie hałasu i wibracji, czy trwałość związana ze zwiększającym się natężeniem ruchu pojazdów ciężarowych. Coraz większą popularnością cieszą się nawierzchnie bezpodsytkowe oraz zabudowywane z materiałów

arm, with or without acoustic signal, etc. Technical protection of level crossings varies also visually (in external form of the devices); there are single- or double-chamber lights, the width of red-and-white strips on barrier arms varies depending on the manner and sequence of their operation in the process of closing of the crossing [7]. For example, safety systems on category A crossings are equipped with: controllers, barrier motors, barrier arms with lamps, traffic warning lights and warning signs. These systems may be connected to station devices employing relays and computers. Level crossings of categories B and C (across four tracks at most) are protected using automatic crossing signals (automated operation of safety devices). Such systems use an array of connections with station devices, in which the home and starting semaphore indications depend on the state of the automated crossing devices. Their operation is supervised remotely by a control device which serves as a higher-level controller [8-10]. In summary, the category of a level crossing and the selected technical protection devices affect the cost of its construction and maintenance.



Fig. 3. Railway level crossing with an automatic user-side protection (category B) with pavement made of rubber crossing slabs

Rys. 3. Przejazd kolejowo-drogowy z systemem automatycznym z zabezpieczeniem (kategoria B) z nawierzchnią drogową z gumowych płyt przejazdowych

Road-railway level crossings may differ not only in safety systems, but also in pavement structures. Many structural solutions for road-railway crossing pavements are available on the market. Analysis presented in this article encompasses solutions used in Poland. Pavement solutions used at level crossings include: large reinforced concrete slabs (Fig. 2), small reinforced concrete slabs, rubber slabs (Fig. 3), and ballastless crossing slabs. Currently,

syntetycznych, które często pochodzą z surowców z recyklingu. Stosowane obecnie w Polsce przejazdowe systemy konstrukcyjne dla ruchu drogowego można podzielić na następujące grupy nawierzchni: bezpodsypkowe, z płyt gumowych, z płyt małogabarytowych, z płyt wielkogabarytowych, z dyliny drewnianej, z mieszanki mineralno-asfaltowej, z kostki kamiennej [11]. W Polsce zastosowanie danego rodzaju nawierzchni na przejazdach kolejowo-drogowych powinno odbywać się zgodnie ze Standardami Technicznymi opracowanymi przez PKP [12]. Jednym z parametrów determinujących wybór odpowiedniego rozwiązania technologicznego jest możliwość jego zabudowy w łuku o wymaganym promieniu. W Polsce najbardziej popularnym rodzajem konstrukcji (przede wszystkim ze względu na najniższe koszty wykonania) są nawierzchnie wykorzystujące wielkogabarytowe płyty przejazdowe. Mimo że wykonywanie nawierzchni tego typu nie jest zalecane, nadal ponad 80% przejazdów kolejowo-drogowych w Polsce jest zbudowanych przy zastosowaniu tego rozwiązania. Drugą najczęściej wykorzystywaną technologią konstrukcji nawierzchni drogowej przejazdów kolejowo-drogowych w Polsce są płyty przejazdowe małogabarytowe, które według szacunków wykorzystano na ponad 1000 przejazdów. Pomijając przejazdy kolejowo-drogowe posiadające nawierzchnię drogową z dyliny drewnianej, trzecią najczęściej wykorzystywaną konstrukcją są gumowe płyty przejazdowe (ponad 200 przejazdów w Polsce wykonanych w tej technologii). Najmniej popularne są natomiast konstrukcje nawierzchni drogowej na przejazdach kolejowo-drogowych oparte o rozwiązania bezpodsypkowe. Ze względu na wysokie koszty wykonania takich przejazdów, ich liczba w Polsce nie przekracza 150. Można również wyróżnić około 100 przejazdów kolejowo-drogowych posiadających nawierzchnię drogową z mieszanki mineralno-asfaltowej. Ponadto można zaobserwować w Polsce ponad 250 przejazdów kolejowo-drogowych o konstrukcjach „mieszanych”, czyli łączących różne technologie, np. nawierzchnię z płyt wielko- i małogabarytowych [11].

#### **4. ANALIZA EKONOMICZNA ROZWIĄZAŃ TECHNICZNYCH PRZEJAZDÓW KOLEJOWO-DROGOWYCH**

Autorzy przeprowadzili szacunkowe analizy danych z 10 polskich kosztorysów inwestorskich z lat 2020-2022, zawierających zbiorcze ceny systemu zabezpieczenia ru-

apart from the construction cost, aspects such as noise/vibrations generation and service life under increasing heavy traffic are also taken into consideration. Synthetic ballastless and track cover solutions are increasingly popular, as they are often produced from recycled material. Crossing pavement systems that are currently used in Poland may be divided into the following groups: ballastless, rubber slabs, small reinforced concrete slabs, large reinforced concrete slabs, wooden planks, asphalt mixture, cobblestones [11]. Application of the selected pavement type at a level crossing in Poland shall be compliant with the Technical Standards issued by PKP [12]. Parameters that determine the choice of appropriate technological solution include the possibility of covering a level crossing located on a horizontal curve of the required radius. The most popular type of crossing pavements in Poland (primarily due to the lowest construction costs) are those using large-size reinforced concrete slabs. Despite the fact that construction of such crossing pavements is unrecommended, over 80% of level crossings in Poland still incorporate this technology. The second most frequently used technology of level crossing pavement in Poland is based on small-size reinforced concrete slabs; it is estimated that over 1000 crossings incorporate this technology. Disregarding level crossings with wooden plank pavements, the third most popular group of pavements incorporates rubber slabs (over 200 level crossings in Poland). Crossing pavements based on ballastless solutions are the least popular. Due to their high construction costs, their number in Poland does not exceed 150. There are also around 100 crossings with asphalt mixture pavements. Additionally, over 250 level crossings may be classified as having “mixed pavements”, i.e. combining different technologies, such as small- and large-size slabs [11].

#### **4. ECONOMIC ANALYSIS OF TECHNICAL SOLUTIONS USED AT ROAD-RAILWAY LEVEL CROSSINGS**

The authors performed evaluation of data from 10 Polish investor cost estimates from 2020-2022, which included total costs of traffic safety systems in the case of construction or reconstruction of level crossings (a single carriage-way road with two lanes crossing a two-track railway line). The average net construction cost of traffic safety devices at a category A (manual) level crossing equals around EUR 111 thousand (PLN 500 thousand). One should bear in mind that in this case the systems are not

chu w przypadku budowy lub przebudowy przejazdów kolejowo-drogowych na liniach kolejowych dwutorowych, krzyżujących się z drogami jednojezdniowymi dwupasowymi. Średni koszt budowy urządzeń zabezpieczenia ruchu dla przejazdu kolejowo-drogowego kategorii A (typ ręczny) wynosi około 111 tys. € (500 tys. PLN) netto. W tym wypadku należy zwrócić uwagę na fakt, że systemy stosowane na tej kategorii nie są automatyczne i wymagają obsługi dróżnika. Oprócz kosztów osobowych (wpływających na koszty eksploatacji), w przyjętej kalkulacji nie brano pod uwagę kosztów budowy dróżnicówki, której koszt wynosiłby od 11 tys. € (50 tys. PLN) netto dla rozwiązań kontenerowych. Według przeprowadzonych analiz średni koszt urządzeń zabezpieczenia ruchu dla przejazdu kolejowo-drogowego kategorii B (typ automatyczny z zabezpieczeniem) wynosi około 160 tys. € (720 tys. PLN) netto, a kategorii C (typ automatyczny z ostrzeżeniem) około 131 tys. € (590 tys. PLN) netto. Są to systemy automatycznego sterowania urządzeniami zabezpieczenia ruchu przejazdów kolejowo-drogowych, nie wymagają więc bezpośredniej obsługi. Niższy koszt w przypadku kategorii C wynika z braku wykorzystania drągów i napędów rogatek. Przejazdy kolejowo-drogowe kategorii D (typ pasywny) natomiast nie posiadają żadnych systemów zabezpieczeń ruchu pojazdów samochodowych i pieszych. Analizując dane przedstawione na Rys. 4 można zauważyć, że koszt wykonania urządzeń zabezpieczenia ruchu wynosi pomiędzy 111 tys. € (500 tys. PLN) netto a 156 tys. € (700 tys. PLN) netto. Biorąc pod uwagę późniejsze koszty eksploatacji związane z obsługą bezpośrednią przez człowieka urządzeń zabezpieczenia ruchu przejazdu kolejowo-drogowego kategorii A można powiedzieć, że bilans ekonomiczny jest zbliżony do przejazdów kategorii B i C. Koszt rogatki z barierami zabraniającymi wjazdu przez pojazdy samochodowe na przejazd w chwili nadawania sygnału „stop” wynosi od 29 tys. € (130 tys. PLN) netto i w ogólnym rozrachunku ekonomicznym stanowi około 18% kosztów całkowitych budowy systemu zabezpieczania ruchu dla przejazdu kolejowo-drogowego kategorii B. Szczegółowe dane dotyczące kosztów budowy systemów zabezpieczania ruchu przedstawiono w Tabl. 1.

Podsumowując, koszty budowy urządzeń zabezpieczenia ruchu dla przejazdów kolejowo-drogowych kategorii A, B i C są wysokie w porównaniu z kosztami wykonania konstrukcji nawierzchni drogowej, niezależnie od kategorii

automated and must be operated by a qualified employee. Apart from personnel costs (which add to operation costs), the adopted calculation omitted the construction of a gateman's lodge, whose net costs would have equaled at least EUR 11 thousand (PLN 50 thousand) even in the case of prefabricated container solutions. According to the performed analysis, the average net construction cost of traffic safety devices is around EUR 160 thousand (PLN 720 thousand) at a category B crossing (automatic with protection) and around EUR 131 thousand (PLN 590 thousand) at a category C crossing (automatic with warning). As these systems include automated control over safety devices, they do not require direct operation by an employee. Lower cost in the case of category C results from the lack of barrier arms and motors. Category D (passive) crossings are not equipped with any safety systems for vehicles or pedestrians. As shown by the data given in Fig. 4, net construction costs of traffic safety devices range from EUR 111 thousand (PLN 500 thousand) and EUR 156 thousand (PLN 700 thousand). Taking into account the later operation costs generated by the need for direct human control over category A crossing safety devices, their general costs are similar to those of category B and C crossings. The net costs of barriers that prevent vehicles from entering the crossing when a “stop” signal is active start at EUR 29 thousand (PLN 130 thousand) and, in general summary, comprise around 18% of the total construction costs of safety systems at a B category level crossing. Detailed data on construction costs of traffic safety systems are given in Tabl. 1.

In summary, construction costs of traffic safety devices at level crossings of the A, B and C categories are relatively high in comparison with the costs of crossing pavement (regardless of crossing category). In general perspective, one is justified to state that construction costs of traffic safety devices at level crossings of the A, B and C categories are similar, since the minimum net construction cost is EUR 111 thousand (PLN 500 thousand), regardless of the selected solution (i.e. regardless of application of full protection with barriers or only warnings). In consequence, changing a passive crossing (category D) into a crossing with traffic safety devices is always costly and requires considerable financial resources.

Analyzing the costs of road-railway level crossing pavements in Poland (based on average unit costs from 20 investor cost estimates from 2022, converted into total

przejazdu. W ujęciu globalnym można powiedzieć, że w przypadku kategorii przejazdów kolejowo-drogowych A, B i C koszty są zbliżone, ponieważ koszt budowy wyniesie minimum 111 tys. € (500 tys. PLN) netto niezależnie od wybranego rozwiązania (tzn. niezależnie od tego czy zastosuje się przejazd wyłącznie z systemem ostrzegawczym, czy z pełnym zabezpieczeniem w postaci rogatki). W rezultacie pod względem ekonomicznym zmiana przejazdu nieposiadającego zabezpieczeń (kategoria D) na posiadający urządzenia zabezpieczenia ruchu jest kosztowna i wymaga dużych nakładów finansowych.

Odnosnie konstrukcji nawierzchni przejazdów kolejowo-drogowych w Polsce, według wyliczeń autorów (bazujących na średnich kosztach jednostkowych zabudowy przejazdu kolejowo-drogowego na linii kolejowej dwutorowej przy przeliczeniu na szerokość jezdni drogowej równej 6 m, przy wykorzystaniu danych z 20 kosztorysów inwestorskich z 2022 r.) płyty przejazdowe wielkogabarytowe stanowią najtańszy z aktualnie dostępnych rodzajów zabudowy. W analizach wzięto pod uwagę koszty zabudowy przejazdu kolejowo-drogowego o szerokości 6 m na linii dwutorowej, a na Rys. 4 przedstawiono średnie koszty jego budowy w zależności od zastosowanego rozwiązania technologicznego. Szacunkowo koszt wykonania nawierzchni drogowej przejazdu kolejowo-drogowego z płyt przejazdowych wielkogabarytowych wynosi około 14 tys. € (62 tys. PLN) netto. Technologia płyt przejazdowych małogabarytowych jest około dwukrotnie droższa; szacunkowy koszt dla przyjętego typu przejazdu kolejowo-drogowego o szerokości 6 m na linii dwutorowej wyniesie około 26 tys. € (115 tys. PLN) netto. Koszt wykonania przejazdu kolejowo-drogowego o wymienionych parametrach w technologii gumowych płyt przejazdowych wynosi około 33 tys. € (150 tys. PLN) netto. Najdroższe rozwiązanie stanowi technologia nawierzchni bezpodsypankowej, w przypadku której koszt zabudowy przejazdu wynosi około 41 tys. € (185 tys. PLN) netto. W analizach kosztów konstrukcji nawierzchni drogowej przejazdu kolejowo-drogowego warto zwrócić uwagę na fakt, że za wyjątkiem niezalecanych do wykorzystywania płyt przejazdowych wielkogabarytowych koszt wykonania przejazdu wynosi od 26 tys. € (115 tys. PLN) netto do 41 tys. € (185 tys. PLN) netto, a więc różnica wynosi około 40%. Z tego względu wybór rodzaju konstrukcji powinien być determinowany przede wszystkim wielkością ruchu pojazdów ciężarowych, które będą miały największy wpływ na trwałość zastosowanego rozwiązania.

costs of four different pavement solutions at a 6-m-wide crossing across a two-track railway line), the authors noted that large-size reinforced concrete slabs are currently the least expensive crossing pavement solution. The analyses ultimately pertained to the total cost of a 6-m-wide crossing pavement across a two-track railway line; average total construction costs of pavements depending on the selected technical solution are presented in Fig. 4. Estimates show that the net cost of a level crossing pavement in the case of large-size reinforced concrete slabs is around EUR 14 thousand (PLN 62 thousand). The technology of small-size reinforced concrete slabs is around twice as expensive; the estimated net cost of the adopted 6-m-wide crossing pavement across a two-track railway line would amount to approximately EUR 26 thousand (PLN 115 thousand). The estimated net cost of a rubber slab pavement at a crossing with the adopted parameters is around EUR 33 thousand (PLN 150 thousand). Ballastless technology proved the most expensive; net cost of a crossing pavement in this technology is around EUR 41 thousand (PLN 185 thousand). It is noteworthy that if the unrecommended large-size concrete slabs are disregarded in the analysis, net pavement costs at the adopted crossing range from EUR 26 thousand (PLN 115 thousand) to EUR 41 thousand (PLN 185 thousand); therefore, relative difference is around 40%. Consequently, crossing pavement solution should be chosen primarily depending on the volume of heavy traffic, which would affect its service life to the greatest degree. Detailed data on the costs of road pavement (crossing slabs) on the adopted level crossing are given in Tabl. 1.

Data shown in Fig. 4 indicate that the costs of safety devices and the costs of pavement (affecting vehicle ride quality) at level crossings should be considered independently. On average, the cost of pavement on a level crossing corresponds to around 25% of the cost of traffic safety devices. Therefore, when level crossings are built or reconstructed, it is more advisable to improve safety by assigning funds for traffic safety systems than to improve pavement technical solution (which mostly affects vehicle ride quality). The performed analyses indicate that level crossing safety should be primarily improved by assigning funds for even the most basic safety system, whose net cost is around EUR 111 thousand (PLN 500 thousand). The net cost of a potential upgrade, e.g. consisting in installation of barriers, is around EUR 29 thousand (PLN 130 thousand), which is similar to the cost of the

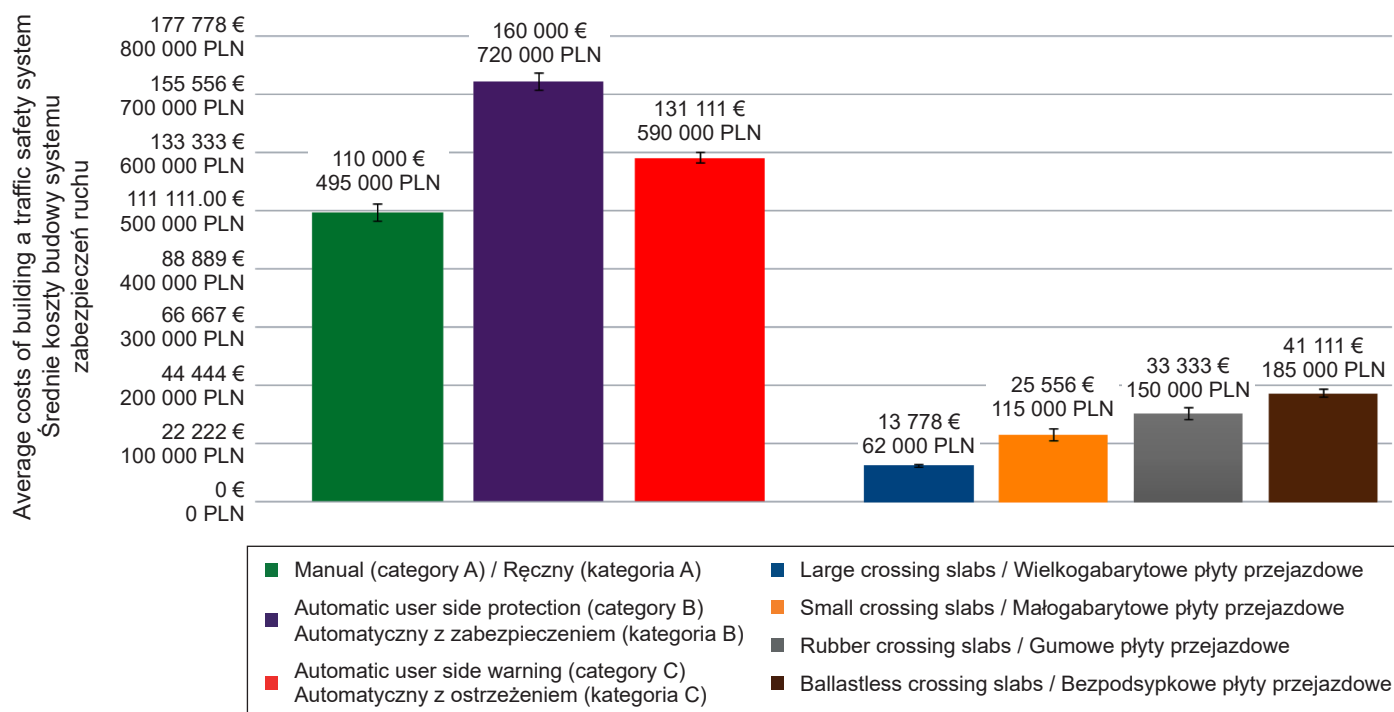


Fig. 4. Average costs of building a traffic safety system in Poland depending on the category of railway level crossing, presented alongside average costs of crossing pavements of various types (according to investor cost estimates from 2020-2022)  
 Rys. 4. Średnie koszty budowy systemu zabezpieczeń ruchu w Polsce w zależności od kategorii przejazdu kolejowo-drogowego, w zestawieniu ze średnimi kosztami nawierzchni różnych rodzajów (wg kosztorysów inwestorskich z lat 2020-2022)

Table 1. Data on the costs of building various traffic safety systems and pavements on railway level crossings of categories A, B, C, based on investor cost estimates

Tablica 1. Dane dotyczące kosztów budowy systemów bezpieczeństwa ruchu oraz nawierzchni przejazdów kolejowo-drogowych o kategorii A, B, C – na podstawie kosztorysów inwestorskich

Level crossing category / Kategoria przejazdu		A	B	C	
Total cost of building a given traffic security system on the level crossing Łączny koszt budowy systemu zabezpieczenia ruchu	€ net / netto	110 000 ± 6 000	160 000 ± 7 333	131 111 ± 5 111	
	PLN net / netto	495 000 ± 27 000	720 000 ± 33 000	590 000 ± 23 000	
Number of investor cost estimates analyzed [pcs.] Liczba analizowanych kosztorysów inwestorskich [szt.]		2	4	4	
Pavement type used on the level crossing Rodzaj nawierzchni płyty przejazdowej		large crossing slabs wielkogabarytowa	small crossing slabs małogabarytowa	rubber gumowa	ballastless bezpodsytkowa
Calculated total cost of building a given pavement with a width of 6 m on a double-track railway line Obliczony łączny koszt budowy nawierzchni o szerokości 6 m na linii kolejowej dwutorowej	€ net / netto	13 778 ± 778	25 556 ± 1 111	33 333 ± 1 444	41 111 ± 1 333
	PLN net / netto	62 000 ± 3 500	115 000 ± 5 000	150 000 ± 6 500	185 000 ± 6 000
Number of investor cost estimates analyzed [pcs.] Liczba analizowanych kosztorysów inwestorskich [szt.]		10	6	2	2

Szczegółowe dane dotyczące kosztów budowy nawierzchni drogowej (płyty przejazdowych) na przejeździe kolejowo-drogowym przedstawiono w Tabl. 1.

Zestawione na Rys. 4 dane pokazują, że w przypadku kosztów budowy przejazdów kolejowo-drogowych należy wyraźnie rozgraniczyć kwestie finansowe związane z urządzeniami zabezpieczenia ruchu oraz z komfortem jazdy pojazdów samochodowych przez taki przejazd. Średnio koszt konstrukcji nawierzchni drogowej przejazdu kolejowo-drogowego stanowi około 25% ceny urządzeń zabezpieczenia ruchu. W związku z tym przy budowie i przebudowie przejazdów kolejowo-drogowych w celu poprawy bezpieczeństwa w większym stopniu powinno się zabezpieczać środki finansowe na systemy zabezpieczenia ruchu, nie zaś na rozwiązania technologiczne związane z konstrukcją nawierzchni drogowej, która wpływa przede wszystkim na komfort jazdy pojazdów samochodowych.

Przeprowadzone analizy wskazują, że w celu poprawy bezpieczeństwa ruchu na przejazdach kolejowo-drogowych w pierwszej kolejności powinno się zabezpieczać środki finansowe na budowę nawet najprostszego systemu zabezpieczeń ruchu, którego koszt to około 111 tys. € (500 tys. PLN) netto. Koszt ewentualnej rozbudowy o np. system rogatki wynosi około 29 tys. € (130 tys. PLN) netto i jest zbliżony do kosztu najtańszego zalecanego rozwiązania konstrukcji nawierzchni drogowej (płyty małogabarytowych), który wynosi około 26 tys. € (115 tys. PLN) netto; jest przy tym o około 11 tys. € (50 tys. PLN) netto niższy niż koszt najdroższego z rozwiązań nawierzchni (nawierzchni bezpodsypkowej).

## 5. ZASTOSOWANIE BSP DO OCENY WIDOCZNOŚCI NA PRZEJAZDACH KOLEJOWO-DROGOWYCH

W celu zapewnienia bezpieczeństwa wszystkim użytkownikom ruchu przejazdu kolejowo-drogowe należy wykonywać zgodnie z przepisami budowlanymi. W Polsce są to warunki techniczne określone w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 20 października 2015 r. [2]. Jednym z wymaganych elementów jest zapewnienie odpowiedniej geometrii przejazdu kolejowo-drogowego pod względem wartości kąta zawartego pomiędzy osią linii kolejowej a osią drogi. Jest to parametr związany z kwestiami projektowymi. Natomiast w kontekście użytkowym i dotyczącym bezpieczeństwa

least expensive among the recommended pavement solutions (small-size concrete slabs, whose net cost is around EUR 26 thousand or PLN 115 thousand); at the same time, it is about EUR 11 thousand (PLN 50 thousand) less than the net cost of the most expensive pavement (ballastless solution).

## 5. APPLICATION OF UAVS IN EVALUATION OF VISIBILITY AT ROAD-RAILWAY LEVEL CROSSINGS

In order to ensure safety of all users, level crossings shall be constructed in accordance with construction regulations. In Poland relevant technical requirements are defined in the regulation of the Minister of Infrastructure and Development from 20 October 2015 [2]. Aspects governed by the requirements include the intersection angle between the center line of the road and the center line of the railway line. This parameter pertains to design. In terms of exploitation and safety of a level crossing, visibility of the front of the train from the road is of major importance [13]. Based on technical requirements [2], railway and road administrators verify visibility at crossings yearly, after the vegetation period has started (i.e. June to September). Visibility is verified based on the so-called visibility triangles (Fig. 5), which reflect the vehicle driver's possibility of seeing an approaching train, assuming that the eyes of the driver are located at the height of 1.0-1.2 m above the road, and at three consecutive distances (20 m, 10 m and 5 m) from the outermost rail head. Lengths of visibility segments measured from the intersection to the front of the approaching train are designated  $L$  and  $L_1$  (Fig. 6) and determined from equations given in Tabl. 2. Results of such visibility surveys may potentially affect the permitted speed of trains approaching the given crossing [14, 15]. As indicated by the analyses presented in [16], treating visibility triangles (which are the valid standard in most countries [17-19]) as the sole basis for ensuring safety of level crossing users is insufficient due to varying weather and road conditions. Obligatory reduction of speed of vehicles approaching the crossing provides noticeable benefits, enabling braking in any weather and road conditions, thus improving safety on such infrastructure. The adopted visibility triangle parameters should also account for the time required by the vehicle to leave the crossing after having come to a complete stop [20] and the position of the driver in the vehicle [21].

na przejeździe kolejowo-drogowym istotnym parametrem jest widoczność czoła pociągu z drogi [13]. Na podstawie warunków technicznych [2] zarządca linii kolejowej oraz zarządca drogi raz w roku, po okresie wzrostu roślin (tzn. pomiędzy czerwcem a wrześniem) sprawdza warunki widoczności. Określane są one na podstawie tzw. trójkątów widoczności (Rys. 5), które służą do określenia możliwości dostrzeżenia nadjeżdżającego pociągu przez kierującego pojazdem z odległości 20 m, 10 m i 5 m od skrajnej główki szyny przyjmując, że oczy kierowcy znajdują się na wysokości 1,0-1,2 m powyżej jezdni. Długości odcinków widoczności czoła pociągu z drogi oznaczane jako  $L$  oraz  $L_1$  (Rys. 6) wyznacza się według wzorów podanych w Tabl. 2. Wyniki z przeprowadzonych pomiarów widoczności mają wpływ na ewentualne ograniczenie prędkości pociągów zbliżających się do przejazdu [14, 15]. Jak wynika z analiz autora pracy [16], opieranie się wyłącznie na trójkątach widoczności (stanowiących standard w większości krajów [17-19]) celem zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników przejazdów jest niewystarczające w przypadku różnych warunków atmosferycznych i drogowych. Obligatoryjne obniżenie prędkości pojazdów samochodowych dojeżdżających do przejazdu zapewnia zauważalne korzyści, umożliwiając wyhamowanie pojazdów w każdych warunkach atmosferycznych i drogowych, co ma wpływ na poprawę bezpieczeństwa na tego typu infrastrukturze. Parametry trójkątów widoczności powinny być ustalane również z uwzględnieniem czasu opuszczenia przejazdu przez pojazd samochodowy po jego zatrzymaniu [20], a także pozycji kierowcy w pojeździe [21].

Do wyznaczania trójkątów widoczności zazwyczaj wykorzystuje się przykładnicę magnetyczną (z tarczką lub bez) wraz z taśmą pomiarową, dalmierzem laserowym lub tachimetrem. Technologie te są rozwijane m.in. poprzez wykorzystanie tachimetru elektronicznego i magnetycznego kwadratu pomiarowego (MMS) [22]. Dodatkowo można wykonywać modelowanie pola widzialności na poziomie pasywnym w celu zwiększenia bezpieczeństwa na przejazdach kolejowo-drogowych [16]. W literaturze można również spotkać przykłady wykorzystania technologii Lidar [23] lub zdjęć pozyskanych z pomocą bezzałogowych statków powietrznych [24].

Bazując na metodzie przedstawionej szczegółowo w publikacji [25], autorzy wykonali przykładową analizę widoczności na przejeździe kolejowo-drogowym przy za-

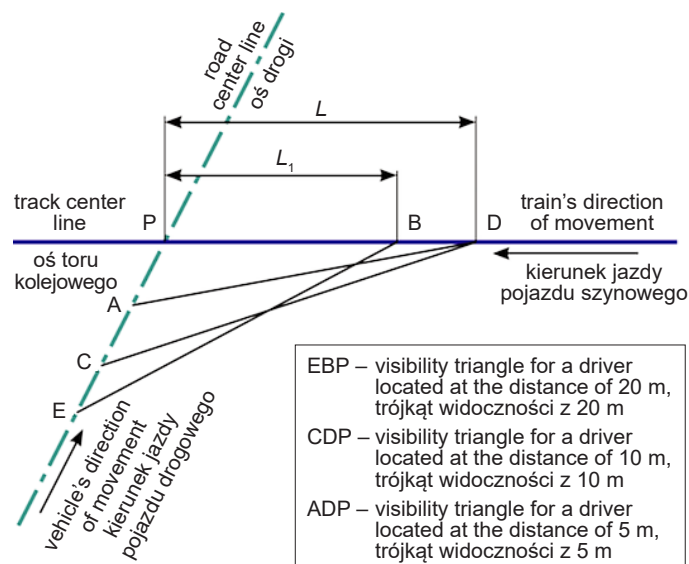


Fig. 5. Diagram of visibility triangles at a railway level crossing [2, 15]

Rys. 5. Schemat trójkątów widoczności na przejeździe kolejowo-drogowym [2, 15]



Fig. 6. Orthophotomap with marked visibility triangles (based on Fig. 4 and Table 2)  
Rys. 6. Ortofotomapa z zaznaczonymi trójkątami widoczności (na podstawie Rys. 4 i Tabl. 2)

Visibility triangles are typically surveyed using a magnetic measuring square (with or without target plates) in combination with a measuring tape, a laser distance meter or a total station. Developments in these technologies include the use of electronic total stations and magnetic measuring squares (MMS) [22]. Field of visibility may be also passively modeled in order to increase

stosowaniu bezzałogowego statku powietrznego (BSP) oraz komputerowego oprogramowania fotogrametrycznego. Szczegółowy opis wykorzystanego BSP i oprogramowania komputerowego znajduje się w publikacji [25]. W celu wygenerowania ortofotomapy o dokładności 1 cm/pixel (fragment wykorzystanej ortofotomapy przedstawiono na Rys. 6) wykorzystano serię 189 zdjęć pozyskanych w trakcie nalogu BSP na wysokości 20 m oraz terenowe pomiary referencyjne za pomocą odbiornika GNSS (ang. Global Navigation Satellite Systems). Pomiary przy wykorzystaniu GNSS służyły do określenia współrzędnych sytuacyjnych (w układzie PL-2000) oraz wysokościowych (w układzie EVRF-2007-NH) fotopunktów i punktów kontrolnych. W analizowanym przypadku błąd całkowity współrzędnych po wyrównaniu (XYZ) dla fotopunktów wynosił 1,6 cm, a dla punktów kontrolnych 1,5 cm. Na Rys. 6, przedstawiającym wycinek uzyskanej ortofotomapy, wrysowano zgodnie z warunkami technicznymi [2] trójkąty widoczności (Rys. 5), zgodnie z następującymi parametrami (obliczenia wg Tabl. 2):

- prędkość pociągu  $V_{\max} = 20$  km/h (rzeczywista prędkość  $V_{\max}$  pociągu na tym odcinku wynosi 60 km/h, ale ze względu na poglądowy charakter pracy i ograniczony rozmiar rysunków zdecydowano się na zmniejszenie prędkości, aby zwiększyć czytelność Rys. 6),
- długość odcinka P–D – odcinek  $L = 110$  m (na Rys. 6 oznaczony kolorem żółtym),
- długość odcinka P–B – odcinek  $L_1 = 72$  m (na Rys. 6 oznaczony kolorem zielonym).

crossing safety [16]. The literature also includes examples of application of LIDAR technology [23] or photographs obtained using unmanned aerial vehicles [24].

Based on the method that has been presented in detail in [25], the authors performed an example visibility analysis at a road-railway crossing using an unmanned aerial vehicle (UAV) and photogrammetry software. A detailed description of the UAV and software used is given in [25]. In order to generate an orthophotomap with the resolution of 1 cm per pixel (whose fragment is shown in Fig. 6), a series of 189 images was obtained during an UAV flight at the altitude of 20 m and combined with reference ground surveys using a GNSS (Global Navigation Satellite Systems) receiver. GNSS surveys enabled determination of horizontal plane coordinates (in the PL-2000 system) and elevation (in the EVRF-2007-NH system) of the ground control points and check points. In the analyzed case, the total error of coordinates after adjustment (XYZ) equaled 1.6 cm for ground control points and 1.5 cm for check points. Visibility triangles (Fig. 5) according to the technical requirements [2] were drawn on a fragment of the obtained orthophotomap (Fig. 6) using the following parameters (calculated as shown in Tabl. 2):

- train speed  $V_{\max} = 20$  km/h (actual train speed  $V_{\max}$  on this section equals 60 km/h, but the speed adopted in the analysis was reduced by the authors due to the demonstrative character of the publication and the limited size of the figure),
- length of the segment P–D – visibility segment  $L = 110$  m (marked in yellow in Fig. 6),
- length of the segment P–B – visibility segment  $L_1 = 72$  m (marked in green in Fig. 6).

Table 2. Lengths of segments of visibility of the train's front from the road [2]

Tablica 2. Długości odcinków widoczności czoła pociągu z drogi [2]

Determination of visibility segments [m] Określenie odcinków [m]	For railway level crossings through Dla przejazdów kolejowo-drogowych przez	
	One track Jeden tor	Two or more tracks Dwa i więcej torów
$L$	$L = 5.5 \cdot V_{\max}^*$	$L = (5.5 + 0.25 d) \cdot V_{\max}^{**}$
$L_1$	$L_1 = 3.6 \cdot V_{\max}$	$L_1 = (3.6 + 0.07 d) \cdot V_{\max}$

\*)  $V_{\max}$  – the highest permitted speed of trains in the area of the railway level crossing [km/h]  
największa dozwolona prędkość pociągów w rejonie przejazdu kolejowo-drogowego [km/h]

\*\*)  $d$  – distance between the center lines of the outermost track and the next track [m]  
odległość między osiami skrajnego i następnego toru [m]

Trójkąty widoczności na Rys. 6 odcinków A–D (dla odległości kierowcy 5 m od skrajnej główki szyny), C–D (dla odległości kierowcy 10 m od skrajnej główki szyny) oraz E–B (dla odległości kierowcy 20 m od skrajnej główki szyny) oznaczono kolorem niebieskim. Ze względu na poglądowy charakter pracy, której celem jest przedstawienie założeń wymienionej metody badawczej, naloty BSP były wykonywane poza okresem wzrostu roślin (czerwiec-wrzesień), wbrew wymogom warunków technicznych [2] dotyczącym oceny widoczności na przejazdach kolejowo-drogowych. Oprócz możliwości analizy trójkątów widoczności z widoku z góry, oprogramowanie fotogrametryczne umożliwia wykonywanie sprawdzenia widoczności z pozycji kierowcy oraz maszynisty, m.in. poprzez wykorzystanie wygenerowanej gęstej chmury punktów (Rys. 7) lub modelu 3D (Rys. 8). Na Rys. 7 przedstawiono widok z pozycji kierowcy z punktu C (odległość 10 m od skrajnej główki szyny) na wysokości 1,0 m, w kierunku punktu B (zgodnie z Rys. 6), wygenerowany przy wykorzystaniu gęstej chmury punktów. Analizując Rys. 7 można zauważyć, że możliwa jest prosta wizualna ocena spełnienia warunków widoczności. Jak widać, w analizowanym przypadku warunków widoczności w okresie wzrostu roślin (naloty BSP były wykonywane w marcu) nie będzie spełniony. Natomiast na Rys. 8 przedstawiono widok z pozycji maszynisty pociągu (widok z punktu B w kierunku punktu C) wygenerowany przy wykorzystaniu modelu 3D z teksturuowaniem. Analizując Rys. 8 można zauważyć, że w wybranym przypadku z pozycji maszynisty pociągu ograniczona jest widoczność pojazdu, rowerzysty lub pieszego znajdującego się na drodze 10 m przed skrajną główką szyny – m.in. ze względu na istniejącą zielen. Wybór rozwiązania wykorzystywanego przy analizie widoczności zależy od indywidualnych potrzeb. Gęsta chmura składa się z setek tysięcy (a nawet milionów) punktów i jest tworzona w pierwszej kolejności, natomiast model mesh, będący wektorową postacią chmury punktów, wykonywany jest w dalszej kolejności i składa się z trójkątów lub innych wielokątów, na które można nałożyć teksturę. Niestety proces tworzenia modelu 3D z teksturą na podstawie gęstej chmury punktów zwiększa czasochłonność całego zadania; podnosi on jednak stopień realizmu obrazu, ponieważ tekstura pozwala na odwzorowanie szczegółów wyglądu powierzchni (np. koloru, faktury).

Visibility triangles shown in Fig. 6 for segments A–D (for a driver located at the distance of 5 m from the outermost rail head), C–D (for a driver located at the distance of 10 m from the outermost rail head) and E–B (for a driver located at the distance of 20 m from the outermost rail head) are marked in blue. Due to the demonstrative character of the work, whose aim is to present the principles of the described method, UAV flights were performed outside of the vegetation period (June-September), against the provisions of the technical requirements [2] on level crossing visibility evaluation. Apart from the potential for visibility triangle analysis in aerial view, photogrammetry software also enables visibility verification from the point of view of the vehicle driver or the train driver, e.g. by using a dense cloud (Fig. 7) or a 3D mesh model (Fig. 8). Fig. 7 presents a view from the driver's position at point C (10 m from the outermost rail head) at the height of 1.0 m, looking towards point B (according to Fig. 6), generated using dense cloud. Analyzing Fig. 7, one may note that a simple visual assessment of visibility conditions is possible. As indicated by the image, visibility requirements in the vegetation period will not be fulfilled (UAV flights were performed in March). Fig. 8 presents a view from the train driver's position (from point B, looking towards point C), generated using a 3D mesh model with textures. As observable in Fig. 8, in this case, from the train driver's point of view, visibility of an approaching vehicle, bicycle or pedestrian (located at the distance of 10 m from the outermost rail head) is limited due to existing vegetation. Selection of the solution applied in visibility analyses depends on the individual needs. A dense cloud comprises hundreds of thousands (or even millions) of points and is created first; the mesh model, which is a vector form of a point cloud, is created subsequently and comprises triangles or other polygons to which textures may be applied. While the process of creation of a textured 3D mesh model makes the entire task more time-consuming, it also makes the image more realistic, since the texture enables representation of visual surface details (e.g. color, grain). Relatively fast performance of surveys, ease of their analysis and accuracy of the obtained results render the presented method a valid alternative to classic methods. Moreover, maintaining a database of UAV survey data enables evaluation of changes occurring in visibility within the year or in successive years at a chosen road-railway crossing.

Stosunkowo duża szybkość wykonania pomiarów, łatwość ich analizy oraz dokładność uzyskanych wyników daje możliwość wykorzystania przedstawionej metody jako alternatywy dla klasycznie stosowanych technik. Dodatkowo dzięki prowadzeniu bazy danych z pomiarów przy wykorzystaniu BSP można kontrolować zmiany zachodzące w warunkach widoczności w ciągu roku czy w kolejnych latach podczas użytkowania wybranego przejazdu kolejowo-drogowego.

## 6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przejazdy kolejowo-drogowe stanowią newralgiczne punkty na mapie linii kolejowych i sieci drogowej pod względem bezpieczeństwa ruchu. Brak zachowania należytej ostrożności – zarówno ze strony maszynistów, osób zarządzających ruchem kolejowym, jak i kierowców pojazdów samochodowych, rowerzystów i pieszych – prowadzi do występowania wypadków, które w wielu sytuacjach kończą się tragicznie. Według raportu [1] Urzędu Transportu Kolejowego aż 43% przejazdów kolejowo-drogowych na czynnych liniach kolejowych w Polsce nie posiada żadnych systemów zabezpieczenia ruchu. Związane jest to z wysokim kosztem wykonania takich systemów, który wynosi średnio 133 tys. € (600 tys. PLN) netto (wg analiz kosztorysów z lat 2020-2022). Jest to znaczny koszt w porównaniu z ceną wykonania samej konstrukcji nawierzchni drogowej przejazdu kolejowo-drogowego, który wynosi od 14 tys. € (62 tys. PLN) netto dla najtańszych (niezalecanych) rozwiązań do 41 tys. € (185 tys. PLN) netto dla najdroższych rozwiązań przejazdowych (wg analiz kosztorysów z roku 2022). Powyższe dane pokazują, że koszty finansowe stanowią największą barierę w budowie systemów zabezpieczenia ruchu.

Zastosowanie bezzałogowego statku powietrznego (BSP) wraz z oprogramowaniem fotogrametrycznym daje możliwość wykonania precyzyjnej oceny widoczności na przejeździe kolejowo-drogowym zgodnie z polskimi warunkami technicznymi [2]. Zaletą wykorzystania tej metody jest możliwość weryfikacji warunków widoczności z różnej odległości (nie tylko zgodnej z wymaganiami technicznymi) i z różnej perspektywy (nie tylko kierowcy, ale maszynisty, pieszego itd.). Dodatkowo, poprzez wykonywanie pomiarów częściej niż raz w roku, można stworzyć prostą bazę danych zawierającą obrazy rejestrujące zmiany zachodzące w warunkach widoczności na przejeździe kolejowo-drogowym w ciągu roku oraz w kolejnych latach.



Fig. 7. View from the driver's position (from point C at the height of 1.0 m, looking towards point B according to Fig. 6) generated using a dense cloud

Rys. 7. Widok z pozycji kierowcy (z punktu C na wysokości 1,0 m, w kierunku punktu B zgodnie z Rys. 6) wygenerowany przy wykorzystaniu gęstej chmury punktów



Fig. 8. View from the train driver's position (from point B, looking towards point C according to Fig. 6) generated using a 3D mesh model with textures

Rys. 8. Widok z pozycji maszynisty pociągu (z punktu B w kierunku punktu C zgodnie z Rys. 6) wygenerowany przy wykorzystaniu modelu 3D z teksturowaniem

## 6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Road-railway level crossings constitute sensitive points on the map of railway lines and road network in terms of traffic safety. Lack of due caution – on the part of train drivers, rail traffic controllers, vehicle drivers, cyclists and pedestrians alike – leads to accidents, which prove tragic in many cases. According to the report by the Polish Office of Rail Transport [1], passive level crossings without any traffic safety systems or devices make up as much as 43% of the total number of crossings on in-service railway lines in Poland. This is related to the considerable cost of such systems, with the average net cost of EUR 133 thousand (PLN 600 thousand), according to the analyses of 2020-2022 cost estimates. It is a significant expense in relation to the net cost of the crossing pavement itself, which ranges from EUR 14 thousand (PLN 62 thousand) for the cheapest (unrecommended) solutions to EUR 41 thousand (PLN 185 thousand) for the most expensive crossing pavement solutions (according

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Koszt budowy urządzeń zabezpieczenia ruchu dla przejazdów kolejowo-drogowych kategorii A (ręczne), B (automatyczne z zabezpieczeniem) i C (automatyczne z ostrzeżeniem) jest zbliżony (wynosi  $\pm 15\%$  wartości średniej). Według statystyk [1] ilość wypadków na przejazdach kolejowo-drogowych kategorii A jest prawie 5-krotnie mniejsza niż w przypadku kategorii C, zaś dla kategorii B – około 2,5-razy mniejsza niż w przypadku kategorii C. W 2022 r. na przejazdach kategorii C w Polsce odnotowano 45 wypadków. Jak pokazują statystyki [1], różnice pomiędzy liczbą wypadków na przejazdach poszczególnych kategorii są znaczące; z tego względu w miarę możliwości finansowych zarządcy powinni starać się stosować przejazdy z fizycznymi zaporami (kategoria A i B), gdyż łączny koszt wykonania tych systemów stanowi  $\pm 15\%$  wartości średniej całego zabezpieczenia ruchu. Jak wykazują obserwacje [26], brak fizycznych zapór zwiększa podejmowanie przez użytkowników dróg zachowań niedozwolonych.
2. Różnica w kosztach wykonania konstrukcji nawierzchni drogowej przejazdu kolejowo-drogowego wynosi około 40% w zależności od wybranego rodzaju rozwiązania technologicznego, z wyłączeniem niezalecanego systemu płyt wielkogabarytowych.
3. Koszty wykonania konstrukcji nawierzchni drogowej przejazdu kolejowo-drogowego stanowią około 25% ceny urządzeń zabezpieczenia ruchu.
4. Poprzez zastosowanie bezzałogowego statku powietrznego oraz komputerowego oprogramowania fotogrametrycznego można w dokładny sposób określić warunki widoczności na przejeździe kolejowo-drogowym oraz dodatkowo zweryfikować warunki widoczności z różnej odległości i perspektywy różnych użytkowników.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Portal statystyczny Urzędu Transportu Kolejowego, <https://dane.utk.gov.pl/sts/infrastruktura/przejazdy-kolejowe/20867,Przejazdy-kolejowo-drogowe.html>, 19.04.2024
- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 20 października 2015 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać skrzyżowania linii kolejowych oraz bocznic kolejowych z drogami i ich usytuowanie (Dz.U. 2015 poz. 1744)

to analyses of cost estimates from 2022). The above data indicate that financial resources constitute the greatest limitation in construction of traffic safety systems.

Use of an unmanned aerial vehicle (UAV) and photogrammetry software enables precise evaluation of visibility at a level crossing in accordance with the Polish technical requirements [2]. Advantages of this method include the possibility of verifying visibility at various distances (not only those defined in the technical requirements) and from different perspectives (train driver's, pedestrian's etc.). Moreover, by performing UAV surveys more frequently than once per year, one may create a simple database containing images that show changes in visibility conditions at the crossing within the year or in successive years.

The following conclusions were formulated based on the performed analyses:

1. Construction costs of traffic safety devices at level crossings of the A (manual), B (automatic with protection) and C (automatic with warning) categories are similar ( $\pm 15\%$  of the average value). According to the statistics [1], the number of accidents at category A level crossings is lower almost by a factor of 5 than at category C crossings; for category B crossings the number is lower by a factor of about 2.5 than at category C crossings. In 2022 there were 45 accidents registered in Poland at category C crossings. Statistics [1] indicate that the differences in the number of accidents at crossings of various categories are significant; therefore, as far as the funds allow, administrators should aim to construct crossings with physical barriers (categories A and B), whose costs are within  $\pm 15\%$  of the average costs of traffic safety devices. As shown by the available observations [26], lack of physical barriers increases the risk of traffic violations by road users.
2. Relative differences in the costs of level crossing pavements reach 40%, depending on the chosen technical solution (excluding the unrecommended system of large-size reinforced concrete slabs).
3. The cost of pavement on a level crossing corresponds to around 25% of the cost of traffic safety devices.
4. Use of an unmanned aerial vehicle (UAV) and photogrammetry software enables precise evaluation of visibility at a level crossing and verification of visibility at various distances and from perspectives of different users.

- [3] *Kamphuis K.*: Road Safety Thematic Report – Railway level crossings. European Commission, Directorate General for Transport, Brussels, 2021
- [4] Raport w sprawie bezpieczeństwa 2022. Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa, 2023
- [5] *Macioszek E., Kurek A., Kowalski B.*: Overview of safety at rail-road crossings in Poland in 2008-2018. *Transport Problems / Problemy Transportu*, **15**, 4(1), 2020, 57-68, DOI: 10.21307/tp-2020-048
- [6] Dyrektywa Komisji Europejskiej 2014/88/UE z dnia 9 lipca 2014 r. zmieniająca dyrektywę 2004/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wspólnych wskaźników bezpieczeństwa oraz wspólnych metod obliczania kosztów wypadków
- [7] *Pikus R.*: Zabezpieczenia przejazdów kolejowych w Polsce – kierunki zmian. *Problemy Kolejnictwa*, **142**, 2006, 53-73
- [8] *Szczygielski M.*: Systemowe rozwiązania, produkcji Z.A. KOMBUD S.A., zabezpieczenia przejazdów kolejowych kategorii A. *Technika Transportu Szynowego*, **11**, 9, 2004, 46-48
- [9] *Lewiński A., Perzyński T.*: Nowoczesne systemy sterowania ruchem kolejowym. *Inżynier Budownictwa*, 7-8, 2014, 1-6
- [10] *Takata T., Asano A., Nakamura H.*: Safety assessment of closed-loop level crossing control systems by means of STAMP (systems-theoretic accident model and processes). *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, **6**, 5, 2018, 241-254, DOI: 10.17265/2328-2142/2018.05.004
- [11] *Kazmierowski P.*: Dobre praktyki w projektowaniu i wykonaniu przejazdów kolejowo-drogowych z perspektywy zarządcy infrastruktury i przewoźnika kolejowego w odniesieniu do LCC (kosztów cyklu życia obiektu). III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Przejazdy Kolejowo-Drogowe 2016 – Nowe technologie w budowie i eksploatacji przejazdów kolejowo-drogowych”, Warszawa, 2016
- [12] Standardy Techniczne, TOM X – Skrzyżowania w poziomie szyn oraz drogi równoległe. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2022
- [13] *Rochel M., Szablowska P.*: Projektowanie skrzyżowań z liniami kolejowymi i bocznicami w świetle nowelizacji przepisów krajowych. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, **20**, 1-2, 2019, 497-501, DOI: 10.24136/atest.2019.094
- [14] *Ludwiczak S.*: Przejazdy kolejowe – nowe wymogi dla zarządców dróg. *Drogi gminne i powiatowe*, 3, 2016, 47-53
- [15] *Cieślakowski S., Rudzki P.*: Analiza i ocena bezpieczeństwa na przejazdach kolejowych. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, **17**, 6, 2016, 117-124
- [16] *Sever D.*: New Approach to Determining Visibility Length on Passive Protected Level Railroad Crossings. *Promet Traffic&Transportation*, **24**, 6, 2012, 479-486, DOI: 10.7307/ptt.v24i6.1203
- [17] Traffic control devices manual. Part 9 Level crossings. NZ Transport Agency, 2012
- [18] *Jovanović D., Čabarkapa M., Pantović D., Destanović D., Vuković M.*: Road safety at road crossings over the railway track – a case study in Montenegro. *International Conference “Road safety strategic management”*, 2014
- [19] Transport Canada: Grade Crossings – Handbook, Ottawa, 2023
- [20] *Veli-Pekka K., Ahtiainen A.*: Determination of Sight Distance Requirements for Finnish Level Crossings. *The Open Transportation Journal*, **5**, 2011, 71-79, DOI: 10.2174/1874447801105010071
- [21] *Gattis J.L., Low S.T.*: Intersection Angle Geometry and the Driver’s Field of View. *Transportation Research Record*, **1612**, 1, 1998, 10-16, DOI: 10.3141/1612-02
- [22] *Kampczyk A.*: An Innovative Approach to Surveying the Geometry of Visibility Triangles at Railway Level Crossings. *Sensors*, **20**, 22, 2020, 6623, DOI: 10.3390/s20226623
- [23] *Jung J., Olsen M.J., Hurwitz D.S., Kashani A.G., Buker K.*: 3D virtual intersection sight distance analysis using lidar data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **86**, 2018, 563-579, DOI: 10.1016/j.trc.2017.12.004
- [24] *Puppala A.J., Banerjee A., Patil U.D.*: Identifying hazardous obstructions within an intersection using unmanned aerial data analysis. *International Journal of Transportation Science and Technology*, **10**, 1, 2021, 34-48, DOI: 10.1016/j.ijst.2020.05.004
- [25] *Malek A.*: Assessment of the use of unmanned aerial vehicles for road pavement condition surveying. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **22**, 4, 2023, 331-345, DOI: 10.7409/rabdim.023.017
- [26] *Vivek A.K., Supta S., Khan T., Mohapatra S.S.*: Strategies to mitigate safety and associated problems at gated rail road grade crossing: A structural equation modelling approach. *Transport Policy*, **146**, 2024, 19-30, DOI: 10.1016/j.tranpol.2023.11.002