



EWA WICHER¹⁾
DAWID KUCHARSKI²⁾

COMPARISON OF SAFETY BARRIER PARAMETERS IN THE CASE OF DOUBLE IMPACT AT THE SAME LOCATION

PORÓWNANIE PARAMETRÓW BEZPIECZEŃSTWA DROGOWEJ BARIERY OCHRONNEJ W SYTUACJI DWUKROTNEGO UDERZENIA W NIĄ POJAZDEM W TYM SAMYM MIEJSCU

STRESZCZENIE. W artykule opisano dwukrotne uderzenie pojazdem osobowym o masie 900 kg w stalową barierę ochronną w tym samym miejscu. Próby zderzeniowe zostały wykonane przez Zespół Testów Zderzeniowych IBDiM na poligonie w Inowrocławiu. Pierwszy test zderzeniowy został przeprowadzony na zamontowanej nowej stalowej barierze ochronnej. Drugi test wykonano na tej samej barierze, odkształconej w wyniku pierwszego uderzenia. Miało to na celu odzwierciedlenie sytuacji spotykanych na drogach, gdy bariera ochronna nie została naprawiona, a miał miejsce kolejny wypadek. Jako parametry opisujące w sposób ilościowy skutki zderzenia wybrano wskaźnik intensywności przyspieszenia (ASI) oraz teoretyczną prędkość głowy w momencie zderzenia (THIV). Analiza tych współczynników uzyskanych z obu testów wykazała, że drogową stalową barierę ochronną po dwukrotnym uderzeniu w nią pojazdem osobowym zachowała swój poziom bezpieczeństwa. Na podstawie obserwacji testów zderzeniowych pojazdów osobowych z barierami ochronnymi można zauważyć, że skutki takich kolizji z perspektywy funkcjonowania barier ochronnych często nie wymagają ich natychmiastowych napraw.

SŁOWA KLUCZOWE: ASI, bariera ochronna, przyspieszenie, teoretyczna prędkość głowy w momencie zderzenia, test zderzeniowy, THIV, wskaźnik intensywności przyspieszenia.

ABSTRACT. The article describes the double impact of a 900-kg passenger vehicle against a steel safety barrier at the same spot. The crash tests were carried out by the IBDiM Crash Test Team at the test site in Inowrocław. The first crash test was carried out on a new steel safety barrier. The second test was performed on the same barrier, damaged in the first impact. The tests reflected situations encountered on the roads when a safety barrier remains unrepaired for a certain time and another accident occurs. Acceleration severity index (ASI) and theoretical head impact velocity (THIV) were chosen as quantitative measures of the consequences of the impact. The analysis of the parameters obtained from both tests showed that the road steel safety barrier retained its safety level after being hit twice by a passenger vehicle. Based on the observations from crash tests of passenger vehicles with safety barriers, the consequences of such collisions in terms of barrier performance often do not require immediate repairs of the deformed barriers.

KEYWORDS: acceleration, acceleration severity index, ASI, crash test, restraint system, theoretical head impact velocity, THIV.

DOI: 10.7409/rabdim.021.020

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; ewicher@ibdim.edu.pl (✉)

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; dawid@ibdim.edu.pl

1. WYKORZYSTANIE TESTÓW ZDERZENIOWYCH W OCENIE BARIER OCHRONNYCH

Funkcjonalność barier ochronnych na drogach krajowych oraz na innych odcinkach dróg została przedstawiona w wytycznych [1]. Wytyczne te skupiają się na sposobie weryfikacji potrzeby stosowania barier drogowych. Dodatkowym elementem opisanym w wytycznych jest właściwy dobór parametrów funkcjonalnych konkretnego typu bariery. Dlatego wyróżniono następujące kategorie oceny zasadności instalacji barier:

- wystąpienie zagrożeń na drodze lub w jej otoczeniu,
- wartości parametrów ruchu drogowego,
- parametry funkcjonalne instalowanych w danym miejscu barier.

Wymagania odnośnie testów zderzeniowych, którym powinny zostać poddane urządzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego, są szczegółowo opisane w normach [2, 3]. Normy te podają trzy główne cechy, według których charakteryzuje się funkcjonalność barier ochronnych:

- a) poziom powstrzymywania – jest to zdolność bariery ochronnej do powstrzymania uderzającego w nią pojazdu, w zależności od jego masy, kąta uderzenia i prędkości uderzenia,
- b) poziom intensywności zderzenia – jest to teoretyczna wartość mająca na celu określenie stopnia ciężkości fizycznego zranienia lub zagrożenia śmiercią dla pasażerów samochodów osobowych podczas zderzenia z barierą ochronną, wyrażona przy pomocy wskaźników *ASI* (intensywności przyspieszenia) i *THIV* (teoretycznej prędkości głowy w momencie zderzenia),
- c) deformacja bariery – wyrażona jest znormalizowanymi wartościami takimi jak:
 - ugięcie dynamiczne – jest to maksymalne poziome przemieszczenie dowolnego punktu na powierzchni czołowej bariery od strony lica bariery,
 - szerokość pracująca – jest to odległość w poziomie pomiędzy dowolną nieodkształconą częścią bariery ochronnej od strony najazdu pojazdu, a jej maksymalnym dynamicznym położeniem w trakcie zderzenia,
 - wtargnięcie pojazdu – jest to maksymalna pozioma odległość między dowolną częścią pojazdu ciężarowego lub autobusu a dowolną nieodkształconą częścią bariery od strony lica.

Analiza problemu długości czasu eksploatacji elementów wyposażenia drogi, ze szczególnym uwzględnieniem barier ochronnych, była jednym z głównych celów projektu RID-3B

1. THE USE OF CRASH TESTS IN THE ASSESSMENT OF ROAD RESTRAINT SYSTEMS

The functionality of safety barriers on national roads and other road sections has been presented in the guidelines [1]. The document is focused on the manner of verification of the need for barrier usage. An additional element described in the guidelines is the appropriate choice of functional parameters for specific barrier types. Therefore, the following criteria for evaluation of the need for barrier installation are established:

- occurrence of danger on the road or in its surroundings,
- values of traffic parameters,
- functional parameters of the barriers to be installed at the specific location.

Requirements regarding crash tests of road safety structures and devices are described in detail in the standards [2, 3]. The standards specify three primary characteristics that reflect the functionality of safety barriers:

- a) containment level – the capacity of the safety barrier to restrain the vehicle upon impact, depending on its weight, angle of impact and impact velocity,
- b) impact severity level – a theoretical measure of the level of physical injury or risk of death of passengers in the impact of a passenger vehicle and safety barrier, expressed by the values of *ASI* (acceleration severity index) and *THIV* (theoretical head impact velocity),
- c) barrier deformation – expressed by normalized values, such as:
 - dynamic deflection – the maximum horizontal displacement of any point at the barrier from the traffic side,
 - working width – the horizontal distance between the barrier from the traffic side in its normal position and any part of the barrier at its maximum dynamic displacement during impact,
 - vehicle intrusion – the maximum horizontal distance between any part of the truck or bus and any non-deformed part of the barrier from the traffic side.

The analysis of service life of various road infrastructure elements, with particular focus on safety barriers, constituted one of the primary goals of the RID-3B project realized within the Road Innovation Development (RID) Program. The project was performed as a collective initiative of the National Centre for Research and Development (NCBiR)

realizowanego w ramach Programu RID (Rozwój Innowacji Drogowych). Projekt ten był realizowany jako wspólna inicjatywa NCBiR oraz GDDKiA. Głównym wykonawcą była Politechnika Gdańska w konsorcjum z Instytutem Badawczym Dróg i Mostów, Instytutem Transportu Samochodowego, Instytutem Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie i Uniwersytecie Gdańskim. Efektem końcowym tego projektu było opracowanie innowacyjnej i kompleksowej metodyki zarządzania drogowymi środkami BRD z uwzględnieniem wpływu czasu i warunków eksploatacyjnych. Pojawiło się przy tym pytanie o funkcjonowanie bariery już wcześniej uszkodzonej przy ponownym najechaniu przez pojazd. Jest to zagadnienie związane bezpośrednio z doprecyzowaniem dopuszczalnego czasu likwidacji i wymiany uszkodzonej bariery. Należy tutaj zaznaczyć, że bezpośrednio w testach zderzeniowych wykonywanych w projekcie RID-3B zajmowano się porównaniem skutków uszkodzeń barier przy najechaniu na nie pojazdami o masie 1500 kg pod kątem najazdu 7°. Dodatkowo przeprowadzono wizje lokalne w terenie, aby sprawdzić w rzeczywistości stan barier po latach użytkowania. Rezultaty tego projektu stały się podstawą wielu prac i publikacji. W jednej z nich [4] autorzy przedstawili propozycję ewaluacji *ex post* wpływu nowych inwestycji drogowych na stan bezpieczeństwa ruchu drogowego.

W wyniku projektu RID-3B, na podstawie badań terenowych, testów zderzeniowych na barierach oraz badań laboratoryjnych, opracowano narzędzia usprawniające zarządzanie drogowymi środkami BRD z uwzględnieniem cyklu życia obiektu, tj.: szacowanie poziomu degradacji i trwałości urządzeń BRD, metody szacowania bezpieczeństwa i kosztów funkcjonowania, jak również zasady wyboru urządzeń BRD, zarządzania odpowiedzialnością za szkody związane z urządzeniami BRD, kontroli funkcjonowania urządzeń BRD oraz prowadzenia działań wydłużających okres eksploatacji. Jednym ze sposobów szacowania poziomu degradacji i trwałości barier ochronnych jest przeprowadzenie rzeczywistych testów zderzeniowych. Testy zderzeniowe barier ochronnych prowadzone są na poligonach badawczych. Poprzez pojęcie bariery ochronnej należy rozumieć poprawnie zmontowane pojedyncze elementy (prowadnice, słupki, łączenia) wraz z ich przymocowaniem do podłoża. Podczas testu zderzeniowego badane jest zachowanie konkretnej bariery, a następnie obliczane są parametry potrzebne do określenia poziomu powstrzymania, poziomu intensywności zderzenia i szerokości pracującej bariery [5].

Parametry badań zderzeniowych oraz warunki, jakie bariery muszą spełnić, podane są w normach PN-EN 1317 [2, 3]. Warunki te określają: prędkość zderzenia, kąt najazdu, masę oraz typ pojazdu. Obecnie coraz powszechniej do badań

and the General Directorate for National Roads and Motorways (GDDKiA). The head scientific partner was the Gdańsk University of Technology, cooperating in a consortium with the Road and Bridge Research Institute, the Motor Transport Institute, the Institute of Precision Mechanics and the University of Gdańsk. The final effect of the project was the development of innovative and comprehensive methodology of road safety measure management, taking into account the time and conditions of service. During the works, the problem of the second vehicle impact with a previously deformed barrier was raised. This problem is directly related to the question of precise determination of the required time of disassembly and replacement of damaged barriers. It should be noted that crash tests conducted under the RID-3B project in order to compare damage to various types of barriers were performed using 1500-kg vehicles at a 7° impact angle. Field investigations were carried out as well, to verify the actual condition of barriers after years of service. The results of the project served as a basis for numerous works and publications, including article [4], whose authors presented a proposition of post-evaluation methodology for the effect of new road projects on road safety.

As a result of the RID-3B project – based on field investigations, crash tests and laboratory tests - new tools were developed to improve road safety measure management, taking into account the life cycle of the structure. They include: methods for estimation of degradation and life of road safety infrastructure, methods for evaluation of safety and service costs, principles for selection of road safety measures, management of responsibility for damage pertaining to road safety infrastructure, supervision of performance of road safety structures and actions leading to the extension of their service life. The methods for estimation of degradation and service life of safety barriers include performance of full-scale crash tests. Such tests are conducted at research testing grounds. The term “safety barrier” hereinafter signifies a correctly assembled system of individual elements (guardrail beams, posts, distance pieces), fixed to the ground in a specific manner. During the crash test, performance of a given barrier is analyzed and parameters are measured enabling determination of containment level, impact severity level and working width [5].

Crash test parameters and conditions to be met by safety barriers are established in the PN-EN 1317 standards [2, 3]. Impact speed, impact angle as well as vehicle weight and type are specified. Currently, numerical simulations become more popular in the research of barrier

właściwości barier, równoległe do testów poligonowych, wykorzystuje się ich symulacje numeryczne. Dają one szczegółowy wgląd w mechanizm zderzenia i pozwalają na szeroką analizę parametryczną różnych konfiguracji pojazd-bariera. Ponadto koszt symulacji jest zdecydowanie niższy niż rzeczywistych testów poligonowych. W publikacji [6] przedstawiono wyniki symulacji numerycznych testu zderzeniowego TB11, w którym pojazd o masie 900 kg uderza w stalową barierę ochronną. W publikacji [7], najbardziej zbliżonej do tematyki przedstawionej w niniejszym artykule, autorzy poruszają kwestię drugiego uderzenia we wcześniej uszkodzony system barier ochronnych. Opisana tam analiza polegała na wykonaniu jednego rzeczywistego testu TB32 z pojazdem osobowym o masie 1500 kg, a następnie wykonaniu dwóch symulacji komputerowych. Pierwsza z nich odwzorowywała test rzeczywisty, czyli była symulacją walidacyjną. W symulacji drugiej jako testowaną barierę wykorzystywano uszkodzoną barierę z symulacji pierwszej. W artykule tym autorzy poddali ocenie bezpieczeństwo drugiego uderzenia pojazdem osobowym o masie 1500 kg w uszkodzoną barierę. Autorzy publikacji [8] poruszają problem wpływu parametrów *ASI* i *THIV* na obrażenia odniesione przez pasażerów w trakcie zderzenia z barierą. W zbliżonym tematycznie opracowaniu [9] przedstawiono wyniki z trzech rzeczywistych testów zderzeniowych i 50 symulacji komputerowych. Symulacje komputerowe obejmowały pojazd osobowy wyposażony w manekina, uderzający w barierę przy różnych prędkościach i pod różnymi kątami najazdu. Autorzy publikacji [8] w oparciu o wyniki uzyskane z czujników przyspieszeń umieszczonych w manekinie pokazali, że chociaż *ASI* wykazywało korelację z ryzykiem urazu, poziom *ASI* wybrany jako rozgraniczenie między barierami klasy B i C nie zapewnia istotnego rozróżnienia między wyższym a niższym ryzykiem urazu. W odróżnieniu od współczynnika *ASI*, wartość graniczna dla parametru *THIV*, która ma zastosowanie do wszystkich klas barier, została uznana za wiarygodny parametr odróżniający akceptowalne i niedopuszczalne ryzyko obrażeń.

Autorzy publikacji [10] uwzględnili w symulacji dynamiczne właściwości materiałów. Właściwości te zostały wyznaczone za pomocą dzielonego pręta dociskowego Hopkinsona. W trakcie symulacji wyznaczono parametry *ASI* i *THIV*, co umożliwiło autorom porównanie działania bariery betonowej i stalowej. Podobnie w publikacji [11] przedstawiono wyniki symulacji komputerowych z udziałem pojazdu i barier drogowych w różnych sytuacjach, tzn. przy różnych masach pojazdu i różnych prędkościach najazdu. Jako wskaźniki pozwalające porównać wyniki z różnych symulacji ponownie wybrano *ASI* i *THIV*. Pozwalają one na porównanie rezultatów osiągniętych w symulacjach komputerowych nie tylko jakościowo, lecz również ilościowo.

properties and are often performed in addition to field tests. They provide detailed insight into the mechanics of the impact and enable comprehensive parametric analysis of various vehicle-barrier configurations. Moreover, the costs of simulations are considerably lower than the costs of full-scale field tests. Publication [6] presents the results of numerical simulations of a TB11 test, in which a 900-kg vehicle crashes into a steel safety barrier. In publication [7], whose subject matter is the most similar to problems presented in this article, the authors discuss the question of the second impact with a previously damaged road restraint system. The analysis described in the article considered the performance of a full-scale TB32 test using a 1500-kg passenger vehicle, followed by two computer simulations. The first simulation reflected the real test and served validation purposes. The initial state of the barrier assumed in the second simulation was equal to the damaged state resulting from the first simulation. The authors of the article evaluated safety in the second impact. The authors of the publication [8] present the problem of the relationship between the *ASI* and *THIV* parameters and the injuries sustained by the passengers during the impact with the barrier. The work [9], whose subject matter is similar, presents the results of 3 full-scale crash tests and 50 computer simulations. The simulations encompassed a passenger vehicle equipped with a dummy, crashing into safety barriers at various speeds and impact angles. Based on the measurements of acceleration sensors placed in a dummy, the authors of [8] showed that while *ASI* was correlated with risk of injury, the level of *ASI* set as the limit between barrier classes B and C did not provide significant differentiation between higher and lower risk of injury. In contrast to *ASI*, the limit value of *THIV*, which is applicable to all barrier classes, was identified as a reliable parameter that enables differentiation between the acceptable and unacceptable risk of injury.

The authors of the publication [10] incorporated the dynamic properties of materials in their simulations. The properties were determined using a split-Hopkinson pressure bar. The values of *ASI* and *THIV* were determined during simulation, enabling a comparison of the performance of concrete and steel barriers. Similarly, publication [11] presents the results of computer simulations of crashes of vehicles into barriers in various situations, i.e. with different vehicle weights and impact speeds. Again, *ASI* and *THIV* were selected as parameters for the comparison of simulation results. They enable comparison of computer simulation results not only in qualitative but also in quantitative terms.

Ciekawie do problemu testów zderzeniowych i ich skutków podeszli autorzy publikacji [12], badający te zagadnienia na terenie Australii. Ich publikacja opisuje serię testów zderzeniowych przeprowadzonych na różnych typach barier. Wybrano trzy grupy barier: linowe, stalowe z prowadnicą oraz betonowe. Jednym z głównych celów przeprowadzonych eksperymentów było określenie, jak duży wpływ na bezpieczeństwo pasażerów siedzących z przodu pojazdu ma uderzenie w konkretny typ bariery. Dodatkowo rozważanym elementem było ryzyko wybuchu poduszki bezpieczeństwa w pojeździe. Głównym wnioskiem z przeprowadzonych badań było stwierdzenie, że wpływ na bezpieczeństwo pasażerów w pojeździe ma poprawność instalacji systemu barierowego, nie zaś jego rodzaj. Działanie każdej bariery opiera się na przejęciu i pochłanianiu energii powstałej w trakcie zderzenia. Od momentu uderzenia pojazdu do jego nakierowania (lub zatrzymania) dochodzi do rozproszenia jego energii kinetycznej. Rozproszenie to, spowodowane jest m.in. przez pracę wynikającą z plastycznej deformacji komponentów bariery oraz z tarcia elementów.

W pracy [13] autorzy poddali analizie działanie i parametry funkcjonalne aktywnej inteligentnej bariery drogowej. Działanie takiej bariery opiera się na systemie automatycznej informacji, który przesyła komunikaty o typie pojazdu potencjalnie uderzającego w barierę, co pozwala na automatyczne dostosowanie jej parametrów do rodzaju uderzającego pojazdu.

2. OCHRONNA BARIERA DROGOWA ZBADANA W TESTACH ZDERZENIOWYCH NA POLIGONIE DOŚWIADCZALNYM

W testach wykorzystano barierę drogową dwustronną, przebadaną na poziom powstrzymywania H2. Oznaczało to wykonanie dwóch testów zderzeniowych: jednego na pojeździe lekkim osobowym (TB11) oraz drugiego z udziałem autobusu (TB51). Całkowita długość zmontowanej bariery wynosiła 72,90 m. Na długość tę składał się odcinek bariery o pełnej wysokości (długość 56,10 m) oraz dwa odcinki zejścia po 8,40 m każdy. Wysokość bariery wynosiła 0,75 m, a odstęp między słupkami: 2,66 m. W obszarze pełnej wysokości bariery słupki ponumerowano od 1 do 22. Numerowanie słupków jest pomocne w opisywaniu bariery zarówno przed, jak i po zderzeniu. Jedną z cech przedstawianą w odniesieniu do numerowanych słupków jest położenie teoretycznego punktu zderzenia. Teoretyczny punkt zderzenia określany jest w pobliżu 1/3 długości systemu. Ze względu na różne szerokości pojazdów niemożliwe jest zachowanie 100% dokładności w podziale długości bariery 1:2. W rzeczywistości po zamontowaniu bariery testowany pojazd dostawiany jest do

An interesting approach to the problem of crash tests and their consequences was presented in Australia by the authors of [12]. The paper presents a series of crash tests performed on different barrier types. Three groups were chosen: concrete barriers, wire rope barriers and steel barriers with guardrails. One of the main goals of the experiment was to determine the effect of the barrier type on the safety of passengers traveling in the front seats of the vehicle. The risk of airbag explosion was also considered. The primary outcome of the research was the conclusion that the safety of passengers of the vehicle is affected only by the correctness of installation of the barrier, and not by its type. The performance of every road barrier is based on the transfer and dissipation of the energy of the impact. From the moment of the impact to redirection (or a complete halt) of the vehicle, its kinetic energy is dissipated, due to – among other factors – the work spent on plastic deformation of barrier components and friction of the elements.

In publication [13], the authors analyzed the operation and functional parameters of an active intelligent road barrier. The operation of such a barrier is based on an automatic information system that sends messages about the type of vehicle potentially hitting the barrier, which allows for automatic adjustment of barrier parameters to the type of vehicle hitting the barrier.

2. ROAD RESTRAINT SYSTEM TESTED IN CRASH TESTS AT THE TEST SITE

The research was performed on a two-sided road barrier that had passed the tests for the H2 containment level - one crash test using a light passenger vehicle (TB11) and one using a bus (TB51). The total length of the installed barrier equaled 72.90 m, consisting of a full-height main section (length of 56.10 m) and two end sections of gradually decreasing height (length of 8.40 m each). The full height of the barrier equaled 0.75 m and the span between the posts equaled 2.66 m. Along the section of full barrier height, the posts were numbered from 1 to 22. Such labeling facilitates the description of the barrier both before and after the impact. One of the parameters presented in relation to the numbered posts is the location of the theoretical point of impact, which was assumed as approximately one-third of the length of the system. Due to varying car widths, it is not possible to precisely divide the barrier at a 1:2 ratio. In reality, after the installation of the barrier, the test vehicle is placed next to the barrier in order to determine the possible point of the first contact.

Dimensions of the tested barrier are presented in Table 1. A view of the installed barrier is shown in Fig. 1.

niej w celu określenia punktu najbardziej zbliżonego do miejsca pierwszego kontaktu pojazdu z barierą.

W Tabl. 1 przedstawiono wymiary geometryczne badanej bariery. Dodatkowo na Rys. 1 przedstawiono widok zainstalowanej bariery.



Fig. 1. General view of the barrier with an end section
Rys. 1. Widok ogólny bariery z zakończeniem od strony najazdu

Do obu testów zderzeniowych użyto pojazdów marki Opel Corsa. Do pierwszego testu przygotowano pojazd, którego masa całkowita w czasie badań wynosiła 929 kg. Pojazd dociążony był balastem ważącym 63,2 kg. Na miejscu dla kierowcy zainstalowano manekina typu HYBRID III. Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1317-2 w pojeździe został zainstalowany zestaw czujników mierzących przyspieszenie. Zestaw ten umieszczono w pobliżu środka ciężkości pojazdu. Na Rys. 2 przedstawiono barierę po pierwszym uderzeniu, natomiast na Rys. 3 barierę po drugim uderzeniu.



a)



b)

Fig. 2. View of the barrier after the first impact (a) showing visible damage at the location of vehicle collision (b)
Rys. 2. Widok bariery po pierwszym uderzeniu (a) ze szczegółami zniszczeń w miejscu najechania przez pojazd (b)

Table 1. Dimensions of the tested protective barrier
Tablica 1. Wymiary geometryczne badanej bariery ochronnej

Characteristic Wyszczególnienie	Description and values Opis i wartości
Barrier fixing details Szczegóły osadzenia bariery w gruncie	posts driven into soil słupki wbijane w grunt
Depth in soil Głębokość osadzenia w gruncie	0.93 m
Total length of the test item Długość całkowita badanej bariery	72.90 m
Full height barrier length Długość bariery na pełnej wysokości	56.10 m
Distance between posts Odległość między słupkami	2.66 m
Length of an ending section Długość odcinka końcowego bariery	8.40 m
Torque for M16 fastening screws Momenty skręcające przy mocowaniu śrubami M16	beam-beam prowadnica-prowadnica ≥ 70 Nm
	beam-distance element prowadnica-przekładka ≥ 70 Nm
	beam-post prowadnica-słupek ≥ 12 Nm

Both crash tests were performed using Opel Corsa cars. The vehicle used in the first test had a gross weight of 929 kg during the test. The car was weighted with a ballast of 63.2 kg. A HYBRID III dummy was installed in the driver seat. In accordance with the requirements of the PN-EN 1317-2 standard, the car was equipped with a set of acceleration sensors. The sensors were placed in the vicinity of the center of gravity of the vehicle. Fig. 2 shows the barrier after the first impact and Fig. 3 presents the barrier after the second impact.

Drugi test zderzeniowy wykonano na tej samej barierze, która po pierwszym zderzeniu nie była naprawiana. Użyto pojazdu badawczego o masie całkowitej wynoszącej 900,6 kg w czasie badań. Pojazd dociążony był balastem ważącym 39,2 kg. Na miejscu dla kierowcy zainstalowano manekina typu HYBRID III oraz zestaw czujników mierzących przyspieszenia.

The second crash test was performed using the same barrier, without any repairs between the tests. The vehicle used in the second test had a gross weight of 900.6 kg during the test. The car was weighted with a ballast of 39.2 kg. A HYBRID III dummy and a set of acceleration sensors were installed as well.



Fig. 3. View of the barrier after the second impact (a) showing visible damage at the location of vehicle collision (b)
Rys. 3. Widok bariery po drugim uderzeniu (a) ze szczegółami zniszczeń w miejscu najechania przez pojazd (b)

Na podstawie testu TB11 bariera uzyskała klasę wskaźnika intensywności zderzenia A, natomiast z testu TB51 uzyskała klasę szerokości pracującej W4. W trakcie wykonywania testu TB11 pojawiło się pytanie, czy badana bariera wytrzyma drugie uderzenie lekkim pojazdem osobowym i jakie będą parametry bariery uzyskane w takim powtórnym teście.

3. OPIS PARAMETRÓW KOLIZYJNYCH BARIERY OCHRONNEJ PO DWÓCH TESTACH ZDERZENIOWYCH

Opisane w artykule testy zderzeniowe z wykorzystaniem lekkiego pojazdu osobowego pozwalają na porównanie wartości parametrów bezpieczeństwa bariery. Do realizacji tego zadania wybrano parametry bezpieczeństwa *ASI* i *THIV*. Choć parametry te wyznaczane są w każdej kategorii testu zderzeniowego, norma PN-EN 1317 jednoznacznie wskazuje na test z pojazdem osobowym jako źródło wartości *ASI* i *THIV* wpiisywanych w certyfikacie bariery.

Warunki, w jakich przeprowadzono rzeczywiste testy zderzeniowe, były określone następująco: kąt najazdu 20°, pojazd osobowy o masie 900 ± 40 kg, prędkość 100 km/h. Zespół Testów Zderzeniowych IBDiM wykonał dwa takie testy, tj. testy typu TB11. Wyniki osiągnięte w obu próbach podano w Tabl. 2.

Based on the TB11 test, the barrier obtained the A-class of the collision severity index, while the TB51 test resulted in a working width class W4. During the TB11 test, a question arose whether the tested barrier would withstand a second impact with a light passenger vehicle and what would be the parameters of the barrier obtained in such a repeated test.

3. DESCRIPTION OF THE COLLISION PARAMETERS OF THE SAFETY BARRIER AFTER TWO CRASH TESTS

The passenger vehicle crash tests described in this section enable comparison of the values of collision parameters. *ASI* and *THIV* were chosen for the comparative analysis. While these parameters are determined in all categories of crash tests, the PN-EN 1317 standard explicitly specifies that the crash tests with passenger vehicles shall be the source of the *ASI* and *THIV* values registered in barrier certificates.

Conditions of the crash tests were adopted as follows: impact angle of 20°, passenger vehicle of a gross weight of 900 ± 40 kg, speed of 100 km/h. The IBDiM Crash Test Team conducted two such tests – i.e. TB11 tests. The results obtained in the two impacts are shown in Table 2.

Table 2. Comparison of the results obtained in the two crash tests
 Tablica 2. Porównanie wyników uzyskanych w dwóch testach zderzeniowych

Tested parameter / Badany parametr	First impact / Pierwsze zderzenie	Second impact / Drugie zderzenie
Impact speed [km/h] Prędkość zderzenia	103	101
Impact angle [°] Kąt zderzenia	20.66	20.14
Working width W_m [m] Szerokość pracująca	1.10	1.25
Normalised working width W_N [m] Znormalizowana szerokość pracująca	1.1	1.2
Class of normalised working width Klasa znormalizowanej szerokości pracującej	W4	W4
Dynamic deflection D_m [m] Maksymalne dynamiczne ugięcie	0.58	0.64
Normalised dynamic deflection D_N [m] Znormalizowane dynamiczne ugięcie	0.5	0.6
Acceleration severity index <i>ASI</i> Wskaźnik intensywności przyspieszenia	0.9	1.0
Theoretical head impact velocity index <i>THIV</i> [km/h] Wskaźnik teoretycznej prędkości głowy w momencie zderzenia	24.0	22.0
Actual impact point Miejsce rzeczywistego punktu zderzenia	1.9 m ahead of post no. 9 1,9 m przed słupkiem nr 9	1.4 m ahead of post no. 9 1,4 m przed słupkiem nr 9
Maximum permanent deflection [m] Maksymalne trwałe odkształcenie	1.08	1.15
Length of vehicle contact with the barrier [m] Długość styku pojazdu z barierą	7.22	7.37

4. PORÓWNANIE ZNISZCZEŃ MECHANICZNYCH BARIERY PO DWÓCH ZDERZENIACH Z UDZIAŁEM POJAZDÓW OSOBOWYCH

Wielostanowiskowy zintegrowany system kamer szybkich, rejestrujący moment zderzenia z różnych perspektyw (z góry, z boku, z przodu, z tyłu) pozwolił na szczegółową analizę zachowania się pojazdu oraz systemu barierowego przed, w trakcie i po zderzeniu. W Tabl. 3 przedstawiono szczegółowe wartości trwałych deformacji bariery. Kolorem niebieskim oznaczono maksymalne wartości przemieszczenia prowadnicy po pierwszym i drugim zderzeniu. Kolorem zielonym oznaczono maksymalne trwałe przemieszczenie całego systemu po pierwszym i drugim zderzeniu. Jako punkty odniesienia na długości bariery wybrano kolejno numerowane słupki. Punkty te definiują miejsce wykonywania pomiarów. Jeśli chodzi o pomiary poziome, prostopadłe do osi wzdłużnej bariery, wybrano jako linię bazową oś czoła bariery w stanie spoczynku przed testem. Pozwala to porównać geometrię

4. COMPARISON OF MECHANICAL DAMAGE TO THE BARRIER AFTER TWO IMPACTS WITH PASSENGER VEHICLES

A multi-unit integrated system of high-speed cameras was used to register the impact from various perspectives (top, side, front and rear views), which enabled a detailed analysis of movements of the vehicle and the barrier system before, during and after the collision. Values of permanent deformation of the barrier are given in Table 3. The maximum values of guardrail beam displacements after both impacts are labeled in blue. The maximum permanent displacement of the entire system after both impacts are labeled in green. The numbered posts served as reference points along the length of the barrier. These points define the locations of measurements. In the case of horizontal measurements perpendicular to the longitudinal axis of the barrier, the original undeformed position of the axis of the face of the guardrail was adopted as a reference, enabling

obiekty przed i po zderzeniu. Poza pomiarami wykonywanymi do czoła prowadnicy dodatkowo mierzono położenie elementu bariery, który uległ największemu przemieszczeniu na danym słupku.

comparison of geometry before and after the impact. In addition to measurements of the position of the face of the guardrail, the position of the outermost element at the location of the given post was also measured.

Table 3. Values of deformation of system
Tablica 3. Wartości deformacji bariery

Post no. Słupek nr	Permanent deformation of the safety barrier measured after the first and second crash test [cm] Trwała deformacja bariery ochronnej mierzona po pierwszym i drugim teście zderzeniowym			
	Beam / Prowadnica		Static working width / Statyczna szerokość pracująca	
	First impact Pierwsze zderzenie	Second impact Drugie zderzenie	First impact Pierwsze zderzenie	Second impact Drugie zderzenie
1	0	0	79	79
2	0	0	79	79
3	0	0	79	79
4	0	0	79	79
5	0	0	79	79
6	2	2	82	82
7	6	7	86	88
8	17	20	98	100
9	35	43	108	112
10	29	46	107	115
11	15	24	94	100
12	4	7	85	87
13	0	0	79	82
14	0	0	79	79
15	0	0	79	79
16	0	0	79	79
17	0	0	79	79
18	0	0	79	79
19	0	0	79	79
20	0	0	79	79
21	0	0	79	79
22	0	0	79	79

Na Rys. 4 przedstawiono wybrane klatki obrazujące przebieg pierwszego i drugiego zderzenia. Klatki te zostały wycięte z filmu zarejestrowanego kamerą szybką od strony najazdu pojazdu. Między pierwszą a ostatnią wyciętą klatką różnica w czasie wynosi około 0,5 s. Zarówno podczas zderzenia z nową barierą jak i barierą uszkodzoną był to czas, w którym nastąpiło odejście pojazdu od bariery.

Fig. 4 presents chosen frames depicting the course of both crash tests. The still images were extracted from the film registered with one of the high-speed cameras. The time interval between the first and the last frame equals approx. 0.5 s. Both in the case of the new barrier and the deformed barrier, the contact of the vehicle with the barrier ended within this period.

5. ANALIZA PARAMETRÓW ASI I THIV PO DWÓCH ZDERZENIACH Z UDZIAŁEM POJAZDÓW OSOBOWYCH

5. ANALYSIS OF ASI AND THIV PARAMETERS AFTER TWO IMPACTS WITH PASSENGER VEHICLES

Podczas każdej próby zderzeniowej w pojeździe osobowym zainstalowane były dwa urządzenia do rejestracji przyspieszeń. Urządzenia te rejestrowały składowe przyspieszeń a_x ,

During the crash tests, two sets of acceleration sensors were operational within both passenger vehicles. The devices registered the a_x , a_y and a_z acceleration components.

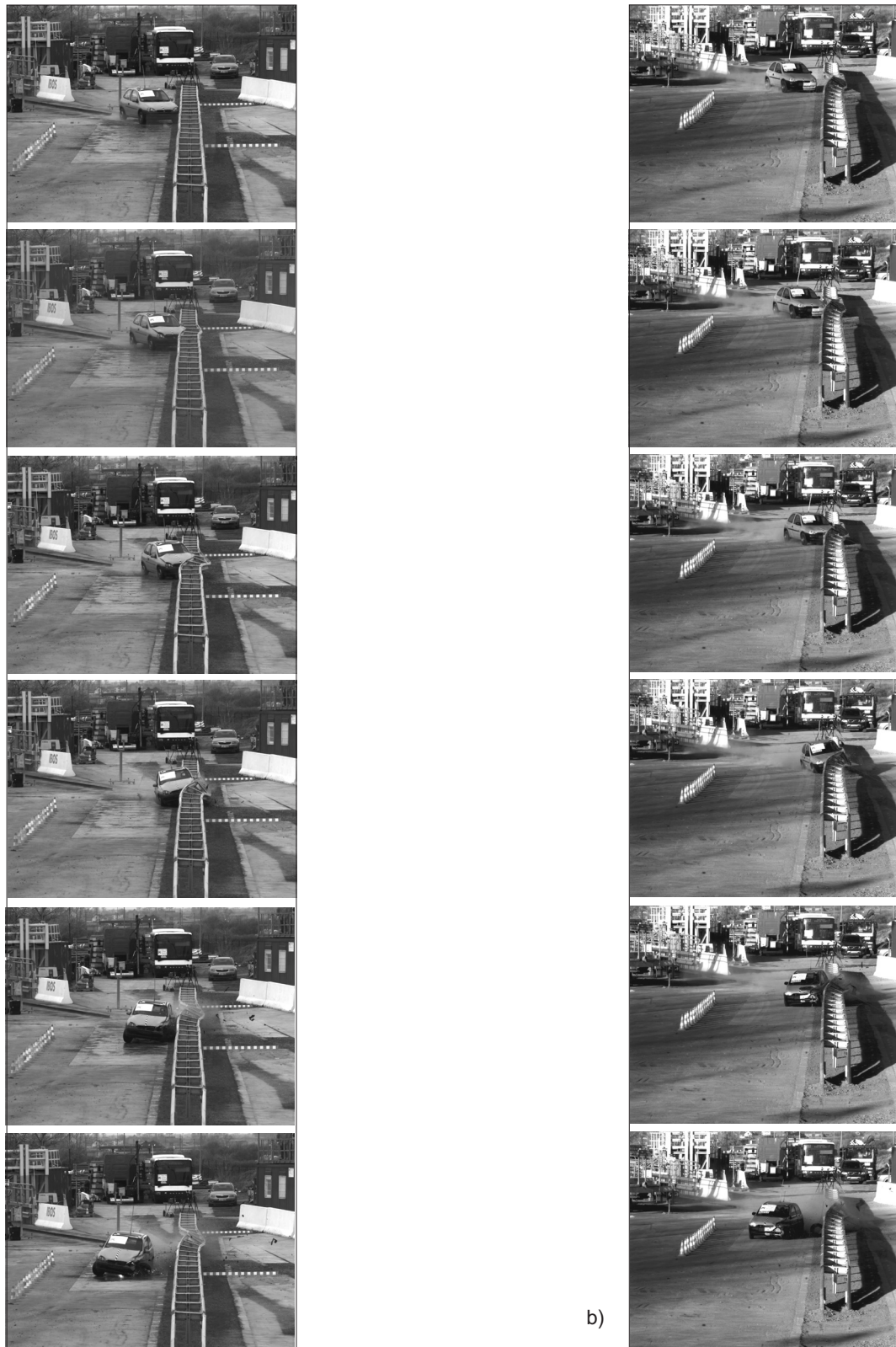


Fig. 4. Comparison of vehicle trajectory and barrier deformation during the first (a) and second impact (b)
Rys. 4. Porównanie toru pojazdu i deformacji bariery przy pierwszym (a) i drugim zderzeniu (b)

a_y i a_z . Oprogramowanie do obsługi rejestratorów pozwala na transformowanie wyników do jednego punktu, którym jest środek ciężkości pojazdu. Dzięki temu można porównywać i analizować te same wielkości uzyskane z dwóch urządzeń. Na podstawie zarejestrowanych przyspieszeń przedstawionych na Rys. 5, 6 oraz 7 wyznaczono parametry *ASI* i *THIV*, charakteryzujące skutki zderzenia. W każdym teście przyspieszenia rejestrowane były za pomocą dwóch urządzeń. W rezultacie otrzymano dwa komplety wyników z każdego testu. Porównanie przebiegów czasowych *ASI* uzyskanych z urządzenia ACCINO 1.5 w trakcie dwóch testów przedstawiono na Rys. 8. Natomiast na Rys. 9 przedstawiono przebieg czasowy *ASI* uzyskany w tych samych dwóch testach z urządzenia ACCINO 2.0. Analogicznie na Rys. 10 i 11 przedstawiono przebiegi czasowe *THIV*.

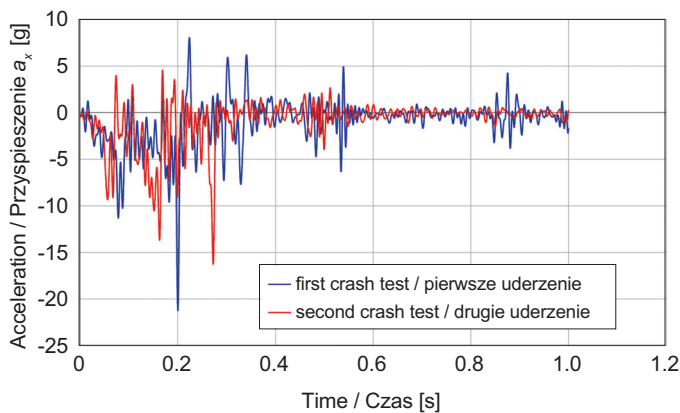


Fig. 5. Graph of the acceleration a_x as a function of time during the first and the second crash test (ACCINO 2.0)

Rys. 5. Wykres przyspieszeń a_x w funkcji czasu podczas pierwszego i drugiego testu zderzeniowego (ACCINO 2.0)

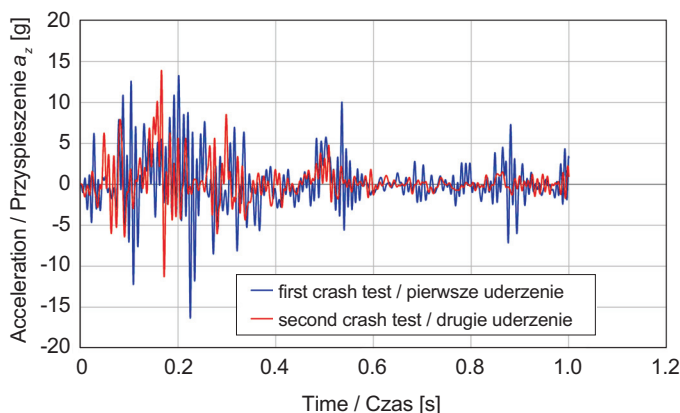


Fig. 7. Graph of the acceleration a_z as a function of time during the first and the second crash test (ACCINO 2.0)

Rys. 7. Wykres przyspieszeń a_z w funkcji czasu podczas pierwszego i drugiego testu zderzeniowego (ACCINO 2.0)

The acceleration sensor software enables transformation of the measurements to one point, i.e. the center of mass of the car. In consequence, comparisons and analyses of data obtained from two different devices are possible. Based on accelerations presented in Figs 5, 6 and 7, the values of *ASI* and *THIV* were determined in order to characterize the consequences of the impact. Since accelerations were registered by two sets of devices, two complete sets of results were obtained from each test. A comparison of the course of changes of *ASI* in time obtained from the ACCINO 1.5 device during both tests is presented in Fig. 8. Changes of *ASI* values in time registered by the ACCINO 2.0 device in both tests are shown in Fig. 9. Analogous charts for the *THIV* parameters are shown in Figs 10 and 11.

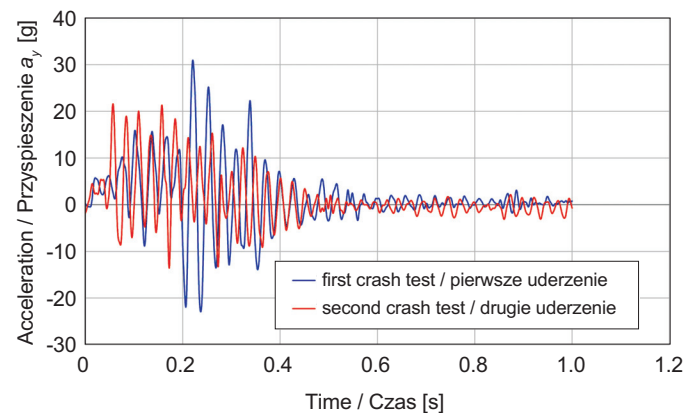


Fig. 6. Graph of the acceleration a_y as a function of time during the first and the second crash test (ACCINO 2.0)

Rys. 6. Wykres przyspieszeń a_y w funkcji czasu podczas pierwszego i drugiego testu zderzeniowego (ACCINO 2.0)

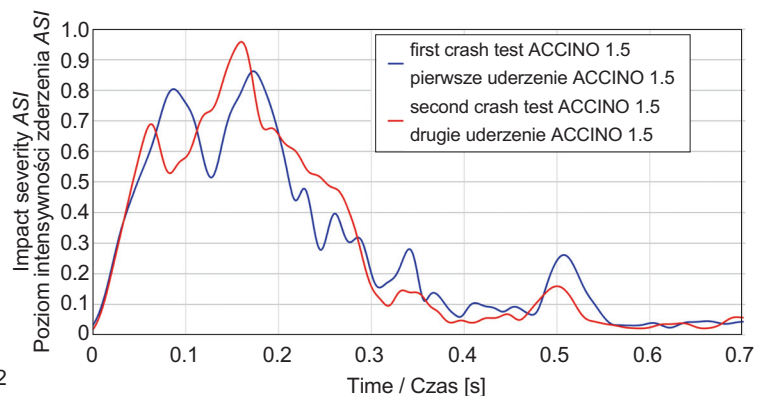


Fig. 8. Graph of *ASI* (ACCINO 1.5) as a function of time during the first and second crash test

Rys. 8. Wykres *ASI* (ACCINO 1.5) w funkcji czasu podczas pierwszego i drugiego testu zderzeniowego

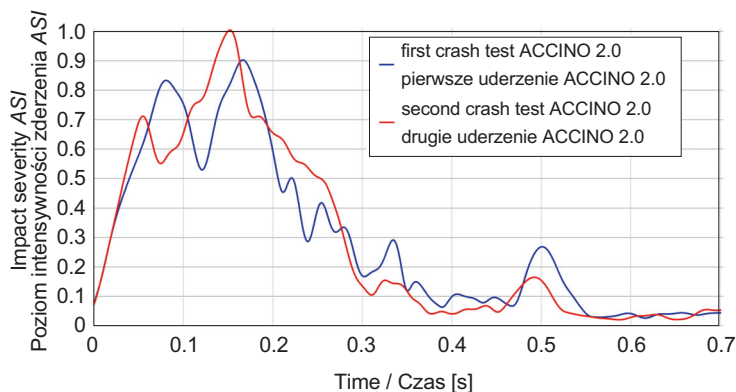


Fig. 9. Graph of ASI (ACCINO 2.0) as a function of time during the first and second crash test

Rys. 9. Wykres ASI (ACCINO 2.0) w funkcji czasu podczas pierwszego i drugiego testu zderzeniowego

Na podstawie analizy przebiegów czasowych parametrów można stwierdzić, że bariera ochronna uderzona dwukrotnie przez pojazd osobowy nie zmieniła klasy intensywności zderzenia, tj. klasy A. Pozostanie po obu testach w tej samej klasie intensywności zderzenia oznacza, że parametry bezpieczeństwa zostały zachowane. Klasa A oznacza wartość wskaźnika intensywności przyspieszenia $ASI \leq 1$ i jednocześnie wartość teoretycznej prędkości głowy w czasie zderzenia $THIV \leq 33$ km/h. ASI w pierwszym zderzeniu wynosiło 0,9, natomiast w drugim zderzeniu: 1,0. Wartość wskaźnika ASI uzyskanego w drugim zderzeniu w stosunku do wartości z pierwszego testu jest o 11% większa. Mimo to wartość wskaźnika intensywności przyspieszenia była w pierwszym i drugim zderzeniu ≤ 1 . Taka wartość ASI zapewnia większy stopień bezpieczeństwa pasażerów pojazdu przy zderzeniu w porównaniu do przypadków, gdy ASI jest większe od jedności. Maksymalna wartość wskaźnika ASI w czasie trwania zderzenia jest uważana za miarę oddziaływania zderzenia na pasażerów. Porównując analogicznie wartość $THIV$ w pierwszym zderzeniu, wynoszącą 24 km/h, z wartością $THIV$ w drugim zderzeniu, wynoszącą 22 km/h widać, że są one zbliżone. Wartość wskaźnika $THIV$ uzyskanego w drugim zderzeniu w stosunku do wartości z pierwszego testu jest o 8,3% mniejsza. Było to spowodowane faktem, że bariera w drugim uderzeniu była bardziej podatna. Dlatego na pojazd w trakcie zderzenia działały mniejsze siły, co bezpośrednio miało wpływ na wartość $THIV$.

6. WNIOSKI

Analiza dwukrotnego uderzenia małego pojazdu osobowego w stalową barierę ochronną w tym samym miejscu została przeprowadzona na podstawie wyników dwóch testów zderzeniowych TB11. Testy zostały wykonane przez Zespół Testów Zderzeniowych IBDiM na poligonie doświadczalnym

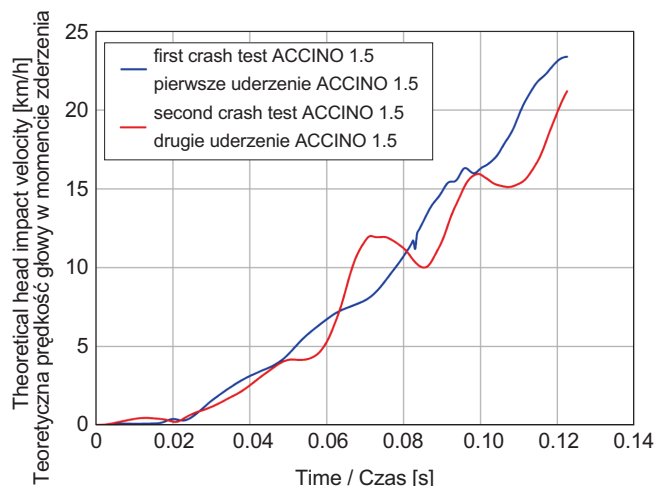


Fig. 10. Graph of THIV (ACCINO 1.5) as a function of time during the first and second crash test

Rys. 10. Wykres THIV (ACCINO 1.5) w funkcji czasu podczas pierwszego i drugiego testu zderzeniowego

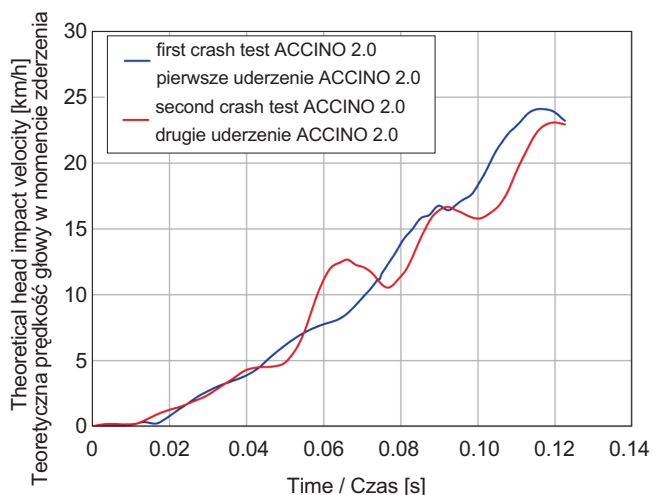


Fig. 11. Graph of THIV (ACCINO 2.0) as a function of time during the first and second crash test

Rys. 11. Wykres THIV (ACCINO 2.0) w funkcji czasu podczas pierwszego i drugiego testu zderzeniowego

Based on the analysis of the charted values from the two crash tests with passenger vehicles, it is observable that the safety barrier did not change the impact severity class, i.e. class A. The fact that the barrier remained in its initial impact severity class implies that it maintained its safety parameters. Class A signifies an acceleration severity index $ASI \leq 1$ and, simultaneously, a theoretical head impact velocity $THIV \leq 33$ km/h. ASI equaled 0.9 in the first impact and 1.0 in the second impact. The value of ASI in the second impact compared to the value in the first impact was greater by 11%. Nevertheless, the value of the acceleration severity index in both crash tests was ≤ 1 . Such a value

w Inowrocławiu. Pierwszy test zderzeniowy wykonano na zamontowanej nowej barierze ochronnej, natomiast drugi test wykonano na tej samej barierze, uszkodzonej w wyniku pierwszego zderzenia. W celu odzwierciedlenia sytuacji spotykanych na drogach badana bariera ochronna nie była naprawiana po pierwszym teście.

Badania wykazały, że drogowa stalowa bariera ochronna po dwukrotnym uderzeniu pojazdu osobowego zachowała swój poziom bezpieczeństwa, tj. szerokość pracującą, wskaźnik intensywności przyspieszenia *ASI* oraz teoretyczną prędkość głowy w czasie zderzenia *THIV*. Powstałe w wyniku pierwszego uderzenia deformacje elementów systemu takich jak słupki, prowadnice i elementy łączące dystansowe nie wpłynęły znacząco na pogorszenie właściwości funkcjonalnych bariery.

W warunkach testowych bariera uległa takim uszkodzeniom, które nie uniemożliwiły jej ponownego powstrzymania uderzającego w nią pojazdu. Można więc przyjąć, że bariera w okresie od pierwszego uszkodzenia do ewentualnej wymiany uszkodzonych elementów zachowuje swoje właściwości w zakresie powstrzymywania pojazdów osobowych.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Wytyczne stosowania drogowych barier ochronnych na drogach krajowych. Załącznik do Zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 23.04.2010
- [2] PN-EN 1317-1:2010 Systemy ograniczające drogę. Część 1: Terminologia i ogólne kryteria metod badań
- [3] PN-EN 1317-2:2010 Systemy ograniczające drogę. Część 2: Klasy działania, kryteria przyjęcia badań zderzeniowych i metody badań barier ochronnych
- [4] Kornalewski L., Kowalska-Sudyka M., Ledwolorz A.: Propozycja metodologii ewaluacji *ex post* wpływu nowej inwestycji drogowej na stan bezpieczeństwa ruchu drogowego. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **19**, 3, 2020, 183-197, DOI: 10.7409/rabdim.020.012
- [5] Antoniuk M., Gumińska L., Jeliński Ł., Wachnicka J.: Wpływ barier ochronnych na poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego. Logistyka, **4**, 2014, 46-53, DOI: 10.13140/2.1.5124.9600
- [6] Bruski D., Burzyński S., Chróścielewski J., Skwira K., Wilde K., Witkowski W.: Wpływ miejsca uderzenia w stalową barierę ochronną oraz uwarstwienia gruntu na wartość parametru *ASI* podczas testu TB11. Modelowanie Inżynierskie, **32**, 63, 2017, 24-31
- [7] Wilde K., Bruski D., Burzyński S., Chróścielewski J., Pachocki Ł., Witkowski W.: On analysis of double-impact test of 1500-kg vehicle into w-beam guardrail system. Archives of Civil Engineering, **67**, 2, 2021, 101-115, DOI: 10.24425/ace.2021.137157
- [8] Meng Y., Untaroiu C.: Numerical investigation of occupant injury risks in car-to-end terminal crashes using dummy-based injury criteria and vehicle-based crash severity metrics. Accident Analysis and Prevention, **145**, 2020, 105700, DOI: 10.1016/j.aap.2020.105700
- [9] Sturt R., Fell C.: The relationship of injury risk to accident severity in impacts with roadside barriers. International Journal of Crashworthiness, **14**, 2, 2009, 165-172, DOI: 10.1080/13588260802614365

of *ASI* ensures greater safety of vehicle passengers than in the case of *ASI* greater than unity. The maximum value of *ASI* during the impact is considered a measure of the effect of the collision on the passengers. An analogous comparison of *THIV* in the first impact (24 km/h) and the second impact (22 km/h) shows that they were similar. *THIV* obtained in the second crash test was lesser by 8.3% than in the first crash test, due to the fact that after the first impact the barrier was less rigid than initially. The forces acting on the vehicle in the second impact were lesser, which directly affected the value of *THIV*.

6. CONCLUSIONS

Analysis of the double impact of a small passenger vehicle with a steel safety barrier at the same location was performed based on two TB11 crash tests. The tests were conducted by the IBDiM Crash Test Team at the test site in Inowrocław. The first crash test was carried out on a new steel safety barrier. The second test was performed on the same barrier, damaged in the first impact. The tests reflected situations encountered on the roads when a safety barrier remains unrepaired for a certain time and another accident occurs.

The research has shown that the steel barrier retained its safety level based on the working width, the acceleration severity index *ASI* and theoretical head impact velocity *THIV*. Deformations of the elements of the system – such as posts, guardrail beams and spacer pieces – occurring due to the first impact did not result in considerable deterioration of functional properties of the barrier.

The damage that occurred in the first test did not prevent the barrier from safe containment of the second vehicle. It may therefore be assumed that a damaged barrier retains its capacity for containment of passenger vehicles in the period between the first impact and replacement of deformed elements.

- [10] *Neves R.R., Fransplass H., Langseth M., Driemeier L., Alves M.*: Performance of some basic types of road barriers subjected to the collision of a light vehicle. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **40**, 6, 2018, 274 (article no.), DOI: 10.1007/s40430-018-1201-x
- [11] *Keršys A., Pakalnis A., Lukoševičius V.*: Investigation of occupant fatalities and injuries during the impact of vehicle and road safety barrier. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **6**, 1, 2011, 5-11, DOI: 10.3846/bjrbe.2011.01
- [12] *Grzebieta R.H., Zou R., Corben B., Judd R., Kulgren A., Tingval C., Powell C.*: Roadside Crash Barrier Testing. *Proceedings of 3rd International Crashworthiness Conference ICRASH2002*, Society of Automotive Engineers, Melbourne, Australia, 2002
- [13] *Bieńka J., Dzieńis T., Godlewski T., Karkowski M., Kula T., Pilarski K., Kaszowski D., Różewicz K.*: Aktywna inteligentna bariera drogowa – nowy system ograniczający drogę. *Magazyn Autostrady*, **5**, 2015, 21-23