

PRZEMYSŁAW GARDAS¹⁾ALICJA SOŁOWCZUK²⁾

ESTIMATION OF THE NECESSARY LENGTH OF STRENGTHENING THE PAVEMENT STRUCTURE IN THE VICINITY OF A BUS STOP ON THE BASIS OF TESTS CARRIED OUT IN A SELECTED CITY

OSZACOWANIE KONIECZNEJ DŁUGOŚCI WZMOCNIENIA KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI W SĄSIEDZTWIE PRZYSTANKU AUTOBUSOWEGO NA PODSTAWIE BADAŃ W WYBRANYM MIEŚCIE

STRESZCZENIE. Obowiązujące wytyczne projektowe klasyfikują konstrukcję nawierzchni w zależności od wyznaczonej kategorii ruchu KR. W przypadku przystanków autobusowych, usytuowanych w ciągu ulicy, nawierzchnia „w rejonie przystanku” powinna być zaprojektowana na KR o jeden stopień wyższą niż KR określona na przyległej jezdni. Oceniając stan nawierzchni w rejonie 100 przystanków zlokalizowanych w wybranym mieście, odnotowano różny stan eksploatacyjny nawierzchni wzdłuż śladu autobusu w rejonie przystanku. Do deformacji nawierzchni zaliczono: osiadania, koleiny i garby, a do uszkodzeń: spękania, ubytki, łaty, uszkodzenia krawężników i włazów, itd. Na wybranych 19 przystankach, różnie usytuowanych względem najbliższego skrzyżowania, oszacowano siły poziome. Wzdłuż śladu autobusu w rejonie przystanku wydzielono 12 sektorów, na których wykonano pomiary czasów przejazdu, prędkości, opóźnień i przyspieszeń autobusów. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej i oszacowano długości wzmożonego oddziaływania sił poziomych na nawierzchnię i wydłużonego czasu oddziaływania na nią obciążenia. Po porównaniu długości wyznaczonych odcinków wzmożonych sił poziomych i wydłużonego czasu oddziaływania na nawierzchnię z miejscami zlokalizowanych deformacji i uszkodzeń oszacowano konieczne długości wzmocnienia nawierzchni na przystankach autobusowych w zależności od ich lokalizacji względem najbliższego skrzyżowania. Uzyskane wyniki długości wzmocnienia konstrukcji nawierzchni wzdłuż dojazdu i odjazdu z przystanku mogą być wykorzystane również w innych miastach.

SŁOWA KLUCZOWE: deformacje nawierzchni, opóźnienie, przyspieszenie, przystanek autobusowy, stan nawierzchni, uszkodzenia nawierzchni, wzmocnienie nawierzchni.

ABSTRACT. The current design guidelines classify the pavement structure depending on the traffic category KR. In the case of bus stops located along a street, the pavement in "the bus stop area" should be designed for a KR one degree higher than the KR determined on the adjoining carriageway. Assessing the condition of the pavement in the area of 100 bus stops located in a selected city the authors noted the different service condition of the pavement along the bus wheel track in the bus stop area. The deformations of the pavement included settlements, ruts and bumps and the pavement distresses included cracks, potholes, patching, damaged curbs and manholes, etc. The horizontal forces were estimated at 19 selected bus stops variously located relative to the nearest intersection. 12 sectors were distinguished along the bus wheel track in the bus stop area and bus drive through times, speed, decelerations and accelerations were measured in these sectors. The results of the measurements were subjected to statistical analyses and the lengths of the intensified impact of the horizontal forces on the pavement and the extended duration of the bus load impact on the pavement were estimated. After the lengths of the sections with intensified horizontal forces and extended time of the impact on the pavement were compared with the locations of pavement deformations and distresses the necessary lengths of pavement strengthening at the bus stops depending on the latter's location relative to the nearest intersection were determined. The determined lengths of pavement structure strengthening along the zones of approach to and departure from the bus stop can be used also in other cities.

KEYWORDS: acceleration, bus stop, deceleration, pavement condition, pavement deformations, pavement distresses, pavement strengthening.

DOI: 10.7409/rabdim.022.003

¹⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin; p.gardas@wp.pl (✉)

²⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; kdim.zut@gmail.com

1. WPROWADZENIE

W dawnych wytycznych projektowych [1, 2] i w obowiązującym obecnie w Polsce katalogu [3] były i są ściśle wyznaczone zasady projektowe odnośnie przyjęcia kategorii ruchu na przystankach w ciągu ulicy i zaprojektowania konstrukcji nawierzchni zapewniającej nośność odpowiednią do kategorii ruchu o jeden wyższej niż na przyległej jezdni. Jednak ogólnikowo sformułowane zalecenia o zastosowaniu innej konstrukcji nawierzchni w „rejonie przystanku” [1-3] nie precyzują, na jakiej konkretnej długości należy wykonać to wzmocnienie ani na jakich przystankach należy je wykonać (pojedynczych, podwójnych czy innych). W starym katalogu [1] zalecano, by przy kategorii ruchu KR6 projektować indywidualnie konstrukcję nawierzchni. Katalog obecnie obowiązujący [3] zmienił to zalecenie i zgodnie z zawartymi w nim zaleceniami przy kategorii ruchu KR6 lub KR7 należy projektować asfaltowe konstrukcje nawierzchni indywidualnie lub projektować konstrukcję nawierzchni z betonu cementowego.

Praktyka wykazuje, że wymóg ten jest w różnym stopniu przestrzegany i stosowany w poszczególnych miastach Polski. W Poznaniu i Gdańsku stosuje się wzmocnienie nawierzchni na odcinku dłuższym niż długość krawędzi peronowej pojedynczego przystanku. Natomiast w Warszawie i Wrocławiu stosuje się bardzo często nawierzchnie betonowe na długości przystanku i na dojeździe do niego. W przypadku zatok autobusowych można na nich odróżnić różne rodzaje nawierzchni. Natomiast w przypadku większości przystanków autobusowych najczęściej stosuje się konstrukcję nawierzchni taką samą, jak na pozostałej części ulicy. Skutkiem zastosowania niewłaściwej konstrukcji nawierzchni często jej stan ulega ciągłemu pogorszeniu, gdyż pojawiają się na niej deformacje i uszkodzenia. Zarządy dróg w niektórych miastach w Polsce dostrzegły już problem wzmożonego oddziaływania obciążenia na nawierzchnię „w rejonie przystanku” i wydały decyzję, że na długości przystanku autobusowego są stosowane nawierzchnie sztywne, tj. z betonu cementowego.

Za granicą zasada stosowania wzmocnionej konstrukcji nawierzchni na przystankach autobusowych jest często stosowana; na długości przystanku znajduje się zwykle nawierzchnia betonowa lub nawierzchnia asfaltowa SMA (ang. *Stone Mastic Asphalt*) [4-11]. Jednak zalecane długości wzmocnionej nawierzchni w poszczególnych krajach są bardzo zróżnicowane: od 12 m do 15 m na przystankach, na których zatrzymują się autobusy zwykle [4, 6, 11] lub 24 m przy autobusach przegubowych [6, 7], do długości kilkudziesięciu metrów, jeśli przystanki są zlokalizowane blisko skrzyżowania [5, 9, 10]. Nowe rozwiązania związane z projektowaniem konstrukcji nawierzchni, prognozowanym stanem eksploatacyjnym

1. INTRODUCTION

In the old design guidelines [1, 2] and in the catalogue currently valid in Poland [3] there are precisely defined design principles applying to traffic categories to be adopted at stops along a street and to the design of a pavement structure with a load bearing capacity proper for the traffic category one degree higher than that on the adjacent carriageway. However, the general recommendation to use a different pavement structure in “the bus stop area” [1-3] does not specify the length of pavement strengthening and to what bus stops (single, double or other) it applies. In the old catalogue [1], for traffic category KR6 it was recommended to individually design the pavement structure. In the current catalogue [3] the above recommendation has been changed and for traffic category KR6 or KR7 it is recommended to individually design asphalt pavement structures or to design a pavement structure made of cement concrete.

Practice shows that the current catalogue recommendation is followed to various degrees in different cities in Poland. In Poznań and Gdańsk a stronger pavement is used along a longer distance than the length of the platform edge of a single bus stop. Whereas in Warsaw and Wrocław a concrete pavement is very often made along the length of both the bus stop and the approach to the latter. In bus bays different kinds of pavement are used, whereas at most bus stops the same pavement structure as in the rest of the street is used. As a result of the use of an improper pavement structure the condition of the pavement continuously deteriorates as deformations and distresses appear on it. Roads authorities in some cities in Poland have already perceived the problem of the intensified impact of load in “the bus stop area” and have decreed that a rigid pavement, i.e. one made of cement concrete, must be used along the length of bus stops.

In other countries the principle that a stronger pavement structure should be used at bus stops is often applied - there is usually a concrete pavement or an SMA (*Stone Mastic Asphalt*) pavement along the length of bus stops [4-11]. But the recommended lengths of the stronger pavement greatly differ between countries: from 12-15 m at bus stops for normal buses [4, 6, 11] or 24 m at bus stops for accordion buses [6, 7] to a few tens of metres for bus stops located close to intersections [5, 9, 10]. A novel solution regarding the design of a pavement structure, the predicted service condition and the simplified modelling of traffic load was presented by Qiang in [12] where bus traffic on minor roads was modelled using the methodology for modelling traffic on roads carrying a high volume of

i uproszczonym modelowaniem obciążenia ruchem opisał Qiang w pracy [12], przedstawiając modelowanie ruchu autobusu na drogach drugorzędnych przy zaimplementowaniu metodyki z modelowania ruchu na drogach o dużym natężeniu ruchu i zastosowaniu uproszczonego podejścia. Zastosowane w [12] modelowanie pozwala, przy znanych wyjściowych warunkach drogowych, określić dominujące rozkłady obciążenia przekazywanego na nawierzchnię.

W dotychczasowych metodach projektowania konstrukcji nawierzchni dróg w Polsce [2] przyjmowano, że pojazdy były w ruchu, a czas kontaktu opony z nawierzchnią wynosił 0,02 s. Powyższe założenia wynikały prawdopodobnie z przekonania, że siły poziome były często pomijalne ze względu na ruch ciągły [13]. Biorąc pod uwagę fakt, że dotychczasowe konstrukcje nawierzchni przystanków autobusowych w większości przypadków w Polsce były zaprojektowane zgodnie z obowiązującymi do 2015 r. wytycznymi [2] i że w pobliżu przystanku charakterystyka ruchu była inna (gdyż siły poziome były znaczne), można zdaniem autorów wyznaczyć w rejonie przystanku charakterystyczne odcinki znacznie dłuższego oddziaływania wzmożonego obciążenia na nawierzchnię w porównaniu do innych fragmentów ulicy z ruchem ciągłym.

Podobne analizy i spostrzeżenia odnośnie stanu nawierzchni, tj. powstawania wzmożonych deformacji i znacznego zwiększenia uszkodzeń nawierzchni w rejonie przystanków autobusowych, opisano w publikacjach [14-18]. W pracy [14] autorzy analizując koszty eksploatacyjne naprawy nawierzchni na wybranych odcinkach ulic New Jersey oszacowali, że koszty remontu nawierzchni w miejscu wzmożonego oddziaływania autobusu na konstrukcję nawierzchni były wyższe niż na pozostałych odcinkach ulicy. W pracy [15] przeanalizowano koszty podróży i koszty eksploatacji autobusów poruszających się po zniszczonych nawierzchniach ulic i opisali interakcję pomiędzy analizowanymi czynnikami. We wnioskach podsumowano, że istnieje związek pomiędzy pogorszoną jakością jazdy autobusu i zwiększonymi przyspieszeniami pionowymi podczas jazdy po zdegradowanej nawierzchni. Fekpe w pracy [16] porównał stan nawierzchni na odcinkach wzmożonego oddziaływania autobusów ze stanem odcinków ulic, po których odbywał się ruch tylko pojazdów ciężarowych z pominięciem autobusów. W rezultacie analiz wykazał, że na odcinkach wzmożonego oddziaływania autobusu na nawierzchnię autobus o długości 30 m powoduje 9-12% więcej uszkodzeń nawierzchni, a autobus o długości 40 m odpowiednio 14-19% więcej uszkodzeń niż pojazdy ciężkie na innych ulicach. We wnioskach z przeprowadzonych badań autorzy publikacji [19, 20] zaproponowali m.in. wprowadzenie trzeciej osi w autobusach zwykłych, prognozując w ten sposób zmniejszenie obciążenia przekazywanego na pojedynczą oś i spowodowanie

traffic, and a simplified approach. For known input road conditions, using the modelling presented [12] one can determine the distributions of the load transmitted onto the pavement.

Previously when designing pavement structures for roads in Poland [2], it was assumed that the vehicles were driving and the tyre/pavement contact amounted to 0.02 s. The above assumptions probably stemmed from the belief that the horizontal forces were often negligible as the traffic was continuous [13]. Considering that most bus stop pavement structures in Poland were then designed in accordance with the guidelines being in force up to 2015 [2], but the traffic characteristic near the bus stops was actually different (the horizontal forces were considerable), the authors think that in the bus stop area one can distinguish characteristic sections with a considerably longer impact of intensified load on the pavement in comparison with the other parts of the street with continuous traffic.

Similar observations and analyses regarding pavement condition, i.e. intensified deformations and greater damage to the pavement in bus stop areas, were made in [14-18]. In study [14], when analysing the costs of pavement repairs on selected sections of streets in New Jersey, the authors found the costs of repairing the pavement in a place of an intensified bus impact on the pavement structure to be higher than on the other street sections. The study [15] analyzes the travelling costs and the operating costs of buses running on damaged pavements of streets and described the interaction between the considered factors. They concluded that there was a dependence between deteriorated bus ride quality and the increased vertical accelerations during driving on a degraded pavement. In study [16] Fekpe compared the condition of the pavement on street sections with an intensified bus impact with the condition of street sections carrying only heavy commercial vehicles without buses. His analyses showed that on the sections with an intensified bus impact on the pavement a 30 m long bus and a 40 m long bus caused respectively 9-12% and 14-19% more pavement distresses than heavy vehicles on other streets. In the conclusions drawn from their investigations the authors of [19, 20] proposed, i.a., to introduce a third axle in normal buses to decrease the load per axle and thereby considerably decrease pavement deformations and so reduce the pavement maintenance costs. Similar conclusions regarding increased pavement deformations and distresses were drawn in study [18] on the basis of an analysis of the condition of the pavement on the streets in Calgary with reference to the street sections with an intensified bus impact on the

w konsekwencji znacznie mniejszych deformacji nawierzchni i mniejszych kosztów utrzymania nawierzchni. Podobne wnioski o zwiększonych deformacjach i uszkodzeniach nawierzchni wykazano również w publikacji [18] na podstawie analizy stanu technicznego nawierzchni na ulicach w Calgary, odnosząc się do odcinków ulic ze wzmożonym oddziaływaniem autobusu na nawierzchnię. W danym przypadku autorzy zaproponowali eksperymentalne „wdrażanie alternatywnych materiałów do konstrukcji nawierzchni na przystanku” (tj. nawierzchni z SMA, warstw modyfikowanych polimerami albo stosowania nakładki betonowej).

Przeprowadzona analiza dotychczasowych wytycznych i publikacji naukowych pozwoliła stwierdzić, że do tej pory nie podjęto próby określenia długości odcinka wzmożonego oddziaływania ruchu autobusów na nawierzchnię w rejonie przystanku autobusowego, a w wytycznych projektowych występuje tylko wspomniany wcześniej zapis „w rejonie przystanku”. Według autorów w odniesieniu do trwałości nawierzchni szczególnie istotne jest uzupełnienie w obowiązujących wytycznych zaleceń dotyczących wyznaczenia długości tego wzmocnienia, co stanowiło główny cel badań prezentowanych w niniejszym artykule.

2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA BADAWCZE I CHARAKTERYSTYKA POLIGONÓW BADAWCZYCH

Uwzględniając powyższe wnioski z przeprowadzonego przeglądu zasad wymiarowania nawierzchni w rejonie przystanków autobusowych, przeprowadzono na ulicach Szczecina własne badania warunków ruchu w rejonie przystanków autobusowych. Biorąc pod uwagę rozważania sformułowane w publikacjach [14-17], wyznaczenie długości wzmożonego oddziaływania ruchu autobusów na nawierzchnię powinno polegać głównie na odpowiednim oszacowaniu warunków ruchu w rejonie przystanków, czyli wyznaczeniu długości występowania maksymalnych sił poziomych.

Wybrane parametry warunków ruchu powinny charakteryzować zarówno przejazd autobusu (np. prędkość, czas oddziaływania obciążenia na nawierzchnię) oraz jego zmienne oddziaływanie na nawierzchnię (czyli siły poziome). Przyjmując jako podstawę powyższe założenia do badań, wstępnie wybrano 100 przystanków autobusowych na terenie Szczecina, które stanowiły podstawową bazę badawczą. Na wszystkich przystankach wykonano ocenę stanu nawierzchni wg metody opisanej w [21].

Przyjęte szerokie spektrum badań wymagało przyjęcia podstawowych założeń badawczych [22], które pozwoliłyby na zapewnienie jednorodności analizowanych danych. Zgodnie z założeniem teorii eksperymentu [22], przystanki wybrane do

pavement. In the considered case the authors proposed to experimentally “implement alternative materials in the construction of the pavement at bus stops” (i.e. make the pavement of SMA or polymer modified layers or cover it with a concrete overlay).

It emerges from the analysis of the existing guidelines and the literature on the subject that so far no attempt has been made to determine the length of the zone of the intensified impact of bus traffic on the pavement in the bus stop area (the guidelines mentioned merely “the bus stop area”). In the authors’ opinion, from the point of view of the fatigue life of the pavement it is essential to complete the guidelines in force with recommendations concerning the determination of the length of above-mentioned zone. This was the main aim of the research presented in this paper.

2. BASIC INVESTIGATION PRINCIPLES AND CHARACTERIZATION OF TEST SITES

Taking into consideration the above conclusions emerging from the review of the principles of dimensioning the pavement in the bus stop area, were carried out their own investigations of the traffic conditions in bus stop areas on the streets of Szczecin. Taking into account the observations made in [14-17], the determination of the length along which there is an intensified bus traffic impact on the pavement in bus stop areas should consist mainly in properly assessing the traffic conditions in these areas, i.e. determining the length along which maximum horizontal forces occur.

The selected parameters of traffic conditions should characterize both the bus drive through (e.g. the speed and the duration of the impact on the pavement) and its variable impact on the pavement (i.e. the horizontal forces). Assuming the above, 100 bus stops in Szczecin were preliminarily selected as a basic test base. At all the bus stops pavement condition was assessed using the method described in [21].

Because of the wide scope of the investigations it was necessary to adopt basic investigation principles [22] which would ensure test data uniformity. According to the experiment theory assumptions [22], the bus stops selected for tests should differ in only one analysed characteristic while the other characteristics should be common for all the bus stops or have similar values. In order to satisfy the data uniformity criterion, the first investigation principle was adopted, i.e. bus stops with a similar traffic volume on the adjacent carriageway and differently distant from the nearest intersection were selected.

badania powinny się różnić między sobą tylko jedną analizowaną cechą, a pozostałe cechy powinny być wspólne lub mieć zbliżone wartości. Kierując się zapewnieniem kryterium jednorodności danych, przyjęto pierwsze założenie badawcze, tj. wytypowano do badań przystanki ze zbliżonym natężeniem ruchu na przyległej jezdni i z wyznaczoną różną odległością od najbliższego skrzyżowania.

Drugim założeniem badawczym był wybór przystanków, na których godzinowe natężenie ruchu autobusów było zbliżone. Dodatkowo uwzględniano jeszcze rodzaj autobusów obsługujących badane przystanki, chcąc zapewnić kryterium jednorodności obciążenia zewnętrznego.

Trzecie założenie badawcze dotyczyło przystanków z jednakową konstrukcją nawierzchni, tj. nawierzchnią asfaltową. W danym przypadku ostateczny wybór przystanków do badań uwzględniał dodatkowo podobny stan techniczny nawierzchni w „rejonie przystanku”. Przyjętą w badaniach metodę oceny stanu technicznego nawierzchni na przystankach autobusowych wraz z oceną efektywności prac remontowych przedstawiono w pracach [21, 23].

Ostatnie, czwarte założenie przyjęte przy wyborze przystanków autobusowych dotyczyło czasu eksploatacji danej nawierzchni. Zapewniając podobny stan techniczny nawierzchni, wybrano tylko przystanki, na których czas eksploatacji nawierzchni wynosił kilkanaście lat.

Następnie, uwzględniając kryterium jednorodności, do badań warunków ruchu wybrano 19 przystanków, zlokalizowanych w różnych odległościach od skrzyżowania. Za odległość pojedynczego przystanku autobusowego od osi skrzyżowania w każdym przypadku przyjęto odległość słupka autobusowego, nazywanego dalej punktem zerowym (Rys. 1). W Polsce jest to orientacyjny punkt na długości krawędzi peronowej danego przystanku, w pobliżu którego najczęściej zatrzymuje się czoło autobusu. Na każdym z wybranych przystanków założono wykonanie min. po 80 pomiarów – prędkości, czasów przejazdu, opóźnień i przyspieszeń każdego autobusu – w 12 wyznaczonych sektorach wzdłuż przystanku. W sektorze, w którym zatrzymał się autobus, założono pomiar czasu postoju oraz wykonanie jeszcze dwóch dodatkowych pomiarów wszystkich parametrów: na dojeździe do miejsca zatrzymania oraz na odjeździe. Warunki ruchu obejmowały przyjęty przez autorów „rejon przystanku”, tj. ok. 80 m przed punktem zerowym i ok. 70 m za punktem zerowym. Powyższe założenia pozwoliły stworzyć podstawową bazę badawczą mierzonych parametrów. Każdy rejon przystanku został umownie podzielony na trzy strefy (Rys. 1): strefę dojazdu, strefę zatrzymania i postoju autobusu oraz strefę odjazdu.

The second investigation principle was to select bus stops at which the hourly bus traffic volume was similar. In addition, the kind of buses stopping at the investigated bus stops was taken into account in order to meet the criterion of external load uniformity.

The third investigation principle applied to bus stops with the same pavement structure, i.e. with an asphalt pavement. In this case, the ultimate choice of bus stops for testing also took into account a similar condition of the pavement in “the bus stop area”. The method used to assess the condition of the pavement at the bus stops and an assessment of the effectiveness of the pavement repair works were presented in [21, 23].

The final (fourth) investigation principle used when selecting bus stops concerned the service lifetime of the pavement. In order to ensure a similar pavement condition, only bus stops at which the pavement had been in service for 10-20 years were selected.

Then taking into account the uniformity criterion, 19 bus stops located at different distances from the intersection were selected. The distance between the bus stop post, referred to as the zero point (Fig. 1), and the axis of the intersection was adopted as the distance of a bus stop from the intersection. In Poland the bus stop post marks the point near which the bus front most often stops. For each of the selected bus stops minimum 80 measurements of the speed, drive through times, decelerations and accelerations of each of the bus were to be carried out in 12 marked sectors along the bus stop. In the sector in which the bus stopped the stoppage time was to be measured and two additional measurements of all the parameters were to be carried out on the approach to the place of stoppage and in the departure zone. Traffic conditions covered the “bus stop area” adopted by the authors, i.e. about 80 m before the zero point and about 70 m after the zero point. Thanks to the above assumptions a basic test base for the measured parameters was created. Each bus stop area was arbitrarily divided into three zones (Fig. 1): an approach zone, a stop and stoppage zone and a departure zone.

Then in order to ensure uniform analytical conditions the selected bus stops were grouped into test sites, depending on the location of a bus stop relative to the nearest intersection. Test site 1 comprised two bus stops on a two-lane street with different carriageway widths, located between intersections (i.e. at the distance of over 200 m from the nearest intersection). Test site 2 comprised eight bus stops located close to an intersection with traffic light signalling, both before and after the intersection. The length of

Następnie, chcąc zapewnić jednorodność warunków analizy, posegregowano wybrane przystanki na trzy poligony badawcze, w zależności od lokalizacji przystanku względem najbliższego skrzyżowania. Poligon badawczy 1 stanowiły dwa przystanki autobusowe na ulicy dwupasowej o różnych szerokościach jezdni, które znajdowały się między skrzyżowaniami (tj. w odległości ponad 200 m od najbliższego skrzyżowania). Poligon badawczy 2 stanowiło osiem przystanków autobusowych zlokalizowanych blisko skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, zarówno przed, jak i za skrzyżowaniem. Założono, że oszacowanie długości wzmoczonego oddziaływania obciążenia autobusu na konstrukcję nawierzchni będzie wykonane oddzielnie dla przypadku lokalizacji przystanku przed i za skrzyżowaniem, przy uwzględnieniu wpływu sygnalizacji świetlnej. Poligon badawczy 3 stanowiło dziewięć przystanków autobusowych zlokalizowanych w pobliżu skrzyżowania zwykłego bez sygnalizacji świetlnej. W tym przypadku przewidywano płynny ruch autobusu w strefie dojazdu, z uwagi na brak wpływu ruchu kolumnowego spowodowanego cyklami sygnalizacji świetlnej.

3. METODY POMIARU

Główny problem techniczny stanowiła konieczność prowadzenia ciągłego pomiaru wielokrotnego, gdyż na wybranym fragmencie ulicy należało pomierzyć po 80 czasów przejazdu autobusu przez dwanaście sektorów różnej długości na każdym analizowanym przystanku. Nieprzydatne więc okazały się radary oraz stałe urządzenia elektroniczne. Uwzględniając powyższe założenia badawcze, wszystkie pomiary czasów przejazdu wykonano, wykorzystując zapis cyfrowy z kamer video z funkcją szczegółowego zapisu czasu, co skrótkowo przedstawiono na Rys. 2 (dla czterech sektorów). Pomocnicze oznaczenia zastosowane na Rys. 2 oznaczają chwilę przecięcia przez czoło autobusu linii wzroku obserwatora z charakterystycznym punktem w terenie – czerwona linia. Pod czerwoną linią oznaczono koniec danego sektora badawczego P_n . W prawym dolnym rogu każdej fotografii przedstawiono czas przejazdu odczytany z kamery.

Newralgiczny w prowadzonych badaniach okazał się sektor pomiarowy, w którym zatrzymywały się autobusy. Przy pomiarach 80 autobusów na każdym z analizowanych przystanków były to zazwyczaj 3-4 sektory zlokalizowane w pobliżu punktu zerowego. W tym sektorze trzeba było każdorazowo do każdego autobusu oddzielnie wyznaczyć pomocnicze dwie długości, jedną od początku danego sektora do miejsca zatrzymania autobusu i drugą od miejsca zatrzymania do końca sektora przy ruszaniu autobusu z miejsca postoju. Uwzględniając

the intensified bus load impact on the pavement structure was to be estimated separately for the bus location before and after the intersection, with the effect of traffic light signalling taken into account. Test site 3 comprised bus stops located near an ordinary (unsignalized) intersection. Considering the absence of the queued traffic effect caused by traffic light signalling cycles, fluid bus motion was assumed in this case.

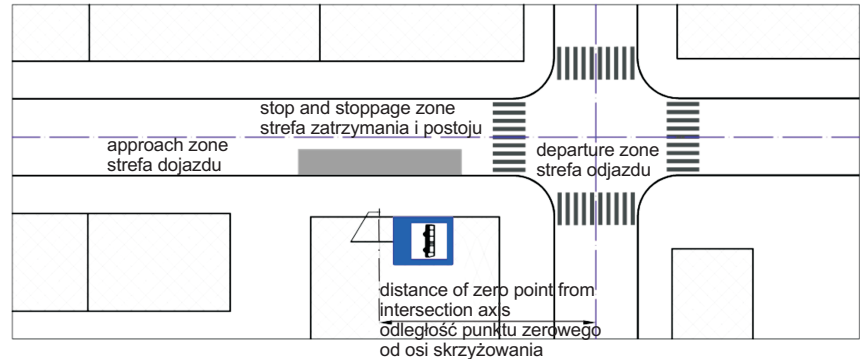


Fig. 1. Computational diagram showing division of bus stop area into three zones and distance of zero point from intersection axis (authors' own study)

Rys. 1. Schemat obliczeniowy sposobu podziału rejonu przystanku na trzy strefy i określania odległości punktu zerowego od osi skrzyżowania (opracowanie własne)

3. MEASURING METHODS

The main technical difficulty was posed by the necessity of conducting repeated continuous measurements – on the selected stretch of the street eighty drive through times were to be measured for each of the twelve sectors of different length at each of the analysed bus stops. As a result, radars and stationary electronic devices proved useless. Taking the above into account, all the drive through time measurements were carried out using digital recording by video cameras with a detailed time recording function, as briefly shown (for four sectors) in Fig. 2. The auxiliary markings in Fig. 2 represent the instant at which the bus front crosses the observer's line of vision with a landmark – the red line. The end of a given tested sector P_n is marked under the red line. The drive through time read off the camera is shown in the bottom right corner of each photograph.

The measuring sector in which buses would stop proved to be crucial. At 80 buses measured at each of the bus stops it usually amounted to 3-4 sectors located near the zero point. In this measuring sector each time for each bus it was necessary to separately determine two auxiliary lengths: one from the beginning of the sector to the place where the bus stopped and the other from the latter place to the end of the sector at bus starting from the stoppage place. Taking the above into account, a “movable” measuring segment, further referred to as Δ , during measurements noted down by

powyższe, przyjęto „ruchomy” odcinek pomiarowy zwany dalej Δ , odnotowywany podczas pomiarów przez drugiego obserwatora oddzielnie dla każdego zatrzymującego się autobusu (Rys. 3). Podane na Rys. 3 długości d_{1l} , d_{1p} i d_{2p} stanowią długości sektorów w strefie zatrzymania i postoju autobusu, a odcinek Δ odnosi się do odległości czoła autobusu od punktu zerowego. Wartość „ $-\Delta$ ” liczona jest jako wartość ujemna, gdy autobus zatrzymał się przed punktem zerowym, wartość „ $+\Delta$ ” liczona jest jako wartość dodatnia, gdy autobus zatrzymał się za punktem zerowym.

the second observer separately for each stopping bus was adopted (Fig. 3). Lengths d_{1l} , d_{1p} and d_{2p} in Fig. 3 are the lengths of the sectors in the stop and stoppage zone and segment Δ represents the distance of the bus front from the zero point. Quantity “ $-\Delta$ ” is calculated as a negative value because the bus stopped before the zero point, whereas quantity “ $+\Delta$ ” is calculated as a positive value because the bus stopped after the zero point.



Fig. 2. Visualization of shortened way of measuring bus drive through times by means of video camera with detailed time recording function; between points P2 and P3 bus approach time (3.00 s) and stoppage time (20.80 s) were taken into account

Rys. 2. Wizualizacja skróconego sposobu pomiaru czasów przejazdu autobusu wykonywanych z wykorzystaniem kamery video z funkcją szczegółowego zapisu czasu; pomiędzy punktami P2 i P3 uwzględniono czas dojazdu (3,00 s) i postoju autobusu na przystanku (20,80 s)

Δ – movable segment, distance of bus front from zero point / odcinek ruchomy, odległość czoła autobusu na postoju od punktu zerowego
 d_{1l} – length of sector before zero point / długość sektora przed punktem zerowym,
 d_{1p} , d_{2p} – lengths of consecutive sectors after zero point / długości kolejnych sektorów za punktem zerowym

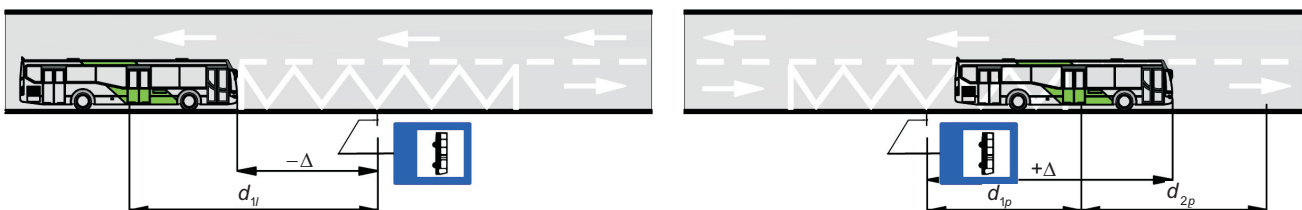


Fig. 3. Diagram for determining length of movable segment Δ for bus stopping before zero point or after it

Rys. 3. Schemat wyznaczania długości ruchomego odcinka Δ , przy zatrzymaniu się autobusu przed punktem zerowym lub za nim

Przyjęty schemat pozwalał na pomiary czasu przejazdu autobusu przy różnej lokalizacji sektorów, w których zatrzymywały się autobusy, jak również określenie lokalizacji największych wartości sił poziomych, z podziałem na opóźnienia i przyspieszenia oraz z uwzględnieniem wydłużonego czasu oddziaływania obciążenia na nawierzchnię w porównaniu do warunków ruchu autobusu podczas jazdy swobodnej. Następnie na potrzeby szacowania długości koniecznego wzmocnienia konstrukcji nawierzchni porównywano odcinki wzmoczonego oddziaływania obciążeń z lokalizacją odnotowanych wcześniej uszkodzeń nawierzchni, zgodnie z metodą opisaną w pracy [23]. Przy weryfikacji otrzymanych długości wzmocnienia nawierzchni porównywano długości otrzymane na analizowanym przystanku z wynikami oceny stanu technicznego nawierzchni na innych przystankach z danego poligonu badawczego, na których nie przeprowadzono badań związanych z warunkami ruchu.

4. METODA BADAWCZA I REZULTATY BADAŃ

Przystępując do analizy otrzymanych wyników, przeprowadzono podstawowy test zgodności Kołmogorowa, dotyczący sprawdzenia rozkładu populacji danych. W odniesieniu do wszystkich populacji prędkości otrzymano na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ pozytywne rezultaty testów (na podstawie porównania z wartościami krytycznymi podanymi w [24]). Błąd pomiarowy czasu przejazdu wynikał z czasu odczytanego na kamerze i wynosił 0,01 s. Błędy przeciętne szacunku analizowanych parametrów były zróżnicowane i zależne od ruchu przyspieszonego lub opóźnionego w poszczególnych sektorach danego przystanku. W strefie postoju zależały dodatkowo od możliwego różnego miejsca postoju autobusu (Rys. 3). Wszystkie długości były odczytywane z podkładów geodezyjnych w skali 1:500.

Do oszacowania długości wzmoczonego oddziaływania ruchu autobusów na nawierzchnię wykorzystano kolejne testy statystyczne: test istotności dla dwóch średnich i test zgodności Kołmogorowa-Smirnowa. Uwzględniając znaczną liczebność wyników testów i liczbę analizowanych przystanków, w Tabl. 1 przedstawiono jako przykład tylko wyniki w odniesieniu do jednego przystanku tj.: analizowane parametry, założone hipotezy, wartości krytyczne i wyniki poszczególnych testów w odniesieniu do prędkości, opóźnień i przyspieszeń. W analizach statystycznych wydzielone strefy zmiennych prędkości pokrywały się z przyjętymi założeniami badawczymi. W strefie dojazdu do przystanku praktycznie wszystkie autobusy zmniejszały prędkości, a w strefie odjazdu zwiększały prędkość. Tylko w strefie zatrzymania i postoju zastosowano inną postać hipotezy, gdyż miejsce rzeczywistego

Using the above diagram it was possible to measure bus drive through times for different locations of the sectors in which buses would stop and to determine the locations of the highest values of horizontal forces, at a division into decelerations and accelerations and taking into account the longer time of the impact of load on the pavement in comparison with bus driving in free flow traffic. Then for the purpose of estimating the length of the necessary strengthening of the pavement structure, sections with an intensified bus load impact were compared with the locations of the previously noted pavement distresses, using the method described in study [23]. When verifying the determined lengths of pavement strengthening, the lengths for a given bus stop were compared with the results of the assessment of pavement condition at the other bus stops within the given test site, at which no tests connected with traffic conditions had been carried out.

4. TEST METHOD AND TEST RESULTS

At the beginning of an analysis of the test results a basic K-S goodness-of-fit test was carried out to check the distribution of the data population. For all the speed populations at significance level $\alpha = 0.05$ positive tests results (in comparison with the critical values given in [24]) were obtained. The drive through time measurement error stemmed from the time read off the camera and amounted to 0.01 sec. The average errors in the estimates of the analysed parameters varied and depended on the accelerated or decelerated motion in the individual sectors of a given bus stop. In the stoppage zone they additionally depended on the possible different bus stoppage places (Fig. 3). All the lengths were read off base maps on a scale of 1:500.

In order to estimate the intensified bus traffic impact on the pavement the two-sample t-test and the two-sample K-S test were used. Considering the considerable number of test results and the number of analysed bus stops, the results (i.e. the analysed parameters, the adopted hypotheses, the critical values and the results of individual tests for speed, decelerations and accelerations) for only one bus stop are presented as an example in Table 1. In the statistical analyses the distinguished zones of variable speeds were consistent with the test assumptions. In the zone of approach to the bus stop practically all the buses would reduce their speed, while in the departure zone they would increase their speed. Only for the stop and stoppage zone the hypothesis was modified as the place of actual stoppage would be different for each bus, whereby some of the buses would brake in a given sector, some would have already stopped, whereas other buses would start from the

postoiu autobusu zmieniało się w przypadku każdego autobusu, co powodowało, że część z nich w danym sektorze hamowała, część autobusów już zatrzymała się, a inne autobusy już ruszały z miejsca postoiu. W Tabl. 1 podano również liczebności przypadków hamowania $n(b)$ i przyspieszania $n(a)$ w każdym z badanych sektorów pomiarowych. Pikiety podano w Tabl. 1 w strefie dojazdu do przystanku i odjazdu z przystanku, zawsze licząc w odległości od punktu zerowego.

place of stoppage. Table 1 also shows the number of braking cases $n(b)$ and acceleration cases $n(a)$ in each of the measurement sectors. The spot heights given in Table 1 are for the zone of approach to the bus stop and the zone of departure from the bus stop, always in relation to the distance from the zero point.

Table 1. Results for exemplary single bus stop located before unsignalized intersection – test site 3

Tablica 1. Zestawienie wyników na przykładowym pojedynczym przystanku, zlokalizowanym przed skrzyżowaniem bez sygnalizacji świetlnej – poligon badawczy 3

Spot height Pikieta	Measurement sectors before zero point Sektory pomiarowe przed punktem zerowym					Measurement sectors after zero point Sektory pomiarowe za punktem zerowym						
	-68.84	-50.91	-38.20	-24.55	-12.76	7.50	17.72	26.91	35.26	44.71	54.48	69.05
Sector no. Nr sektora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
v_{mean} / v_{sr} [km/h]	38.0	34.5	31.4	27.2	23.9	16.1	7.8	12.3	20.6	25.4	28.6	31.8
b_{mean} / b_{sr} [m/s ²]	-0.6	-0.7	-0.8	-0.6	-1.1	-1.3	-0.9	-0.7	-	-	-	0.0
$n(b)$ [-]	80	79	80	79	80	80	80	14	-	-	-	3
a_{mean} / a_{sr} [m/s ²]	-	-	-	-	-	-	0.8	1.0	1.3	1.0	0.7	0.6
$n(a)$ [-]	-	-	-	-	-	-	66	80	80	80	80	77
t [s]	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.11	0.09	0.04	0.03	0.03	0.02
$n(t)$ [-]	80	80	80	80	80	80	146	94	80	80	80	80
K-S goodness-of-fit test results λ for speed and combined acceleration and deceleration values (data population distribution check), at $\lambda_{\alpha} = 1.36$ Wyniki testów zgodności Kołmogorowa λ w odniesieniu do prędkości oraz połączonych wartości przyspieszenia i opóźnienia (sprawdzenie rozkładu populacji danych), przy $\lambda_{\alpha} = 1,36$												
$\lambda(v)$	0.32	0.46	0.72	0.80	1.23	0.63	0.40	1.35	0.28	0.63	0.74	0.39
$\lambda(a \text{ and } i \text{ } b)$	0.68	0.42	1.35	0.57	1.35	1.08	1.33	1.33	0.81	0.78	0.46	0.46
Two-sample K-S test results λ for speed and combined acceleration and deceleration values estimated on consecutive sectors i and $i+1$ (comparison of two distribution functions), at $\lambda_{\alpha=0.05} = 1.36$ Wyniki testów zgodności Kołmogorowa-Smirnowa λ w odniesieniu do prędkości oraz połączonych wartości przyspieszenia i opóźnienia oszacowanych na następujących po sobie sektorach i i $i+1$ (porównanie dwóch dystrybuant), przy $\lambda_{\alpha=0.05} = 1,36$												
Sectors Sektory	1 and/i 2	2 and/i 3	3 and/i 4	4 and/i 5	5 and/i 6	6 and/i 7	7 and/i 9	8 and/i 9	9 and/i 10	10 and/i 11	11 and/i 12	
$\lambda(v)$	2.06	2.53	3.40	3.40	5.06	6.19	4.48	4.99	3.64	2.21	2.37	
$\lambda(a \text{ and } i \text{ } b)$	1.19	0.63	1.03	4.11	1.42	3.93	3.27	2.02	1.58	1.34	1.11	
Two-sample t-test results for speed and combined acceleration and deceleration values estimated on consecutive sectors i and $i+1$ Wyniki testu istotności dla dwóch średnich w odniesieniu do prędkości oraz połączonych wartości przyspieszenia i opóźnienia oszacowanych na następujących po sobie sektorach i i $i+1$												
Braking / Hamowanie $H_0: v_i = v_{i+1}, i.e./czyli u \leq u_{\alpha}$ $H_1: v_i > v_{i+1}, i.e./czyli u > u_{\alpha}$				Stop and stoppage / Zatrzymanie i postój $H_0: v_i = v_{i+1}, i.e./czyli u \leq u_{\alpha}$ $H_1: v_i \neq v_{i+1}, i.e./czyli u > u_{\alpha}$					Starting / Ruszanie $H_0: v_i = v_{i+1}, i.e./czyli u \leq u_{\alpha}$ $H_1: v_i < v_{i+1}, i.e./czyli u < u_{\alpha}$			
Sectors Sektory	1 and/i 2	2 and/i 3	3 and/i 4	4 and/i 5	5 and/i 6	6 and/i 7	7 and/i 9	8 and/i 9	9 and/i 10	10 and/i 11	11 and/i 12	
$u(v)$	6.05	5.63	7.43	5.87	15.6	21.94	8.28	14.36	10.03	6.24	6.05	
$u_{\alpha} = 1.64$				$u_{\alpha} = 1.96$					$u_{\alpha} = 1.64$			
Braking / Hamowanie $H_0: b_i = b_{i+1}, i.e./czyli u \leq u_{\alpha}$ $H_1: b_i > b_{i+1}, i.e./czyli u > u_{\alpha}$				Stop and stoppage / Zatrzymanie i postój $H_0: b_i = b_{i+1}, i.e./czyli u \leq u_{\alpha}$ $H_1: b_i \neq b_{i+1}, i.e./czyli u > u_{\alpha}$					Starting / Ruszanie $H_0: a_i = a_{i+1}, i.e./czyli u \leq u_{\alpha}$ $H_1: a_i < a_{i+1}, i.e./czyli u < u_{\alpha}$			
Sectors Sektory	1 and/i 2	2 and/i 3	3 and/i 4	4 and/i 5	5 and/i 6	6 and/i 7	7 and/i 9	8 and/i 9	9 and/i 10	10 and/i 11	11 and/i 12	
$u(a \text{ and } i \text{ } b)$	1.42	1.60	-2.44	8.96	1.46	12.52	8.17	6.06	3.13	3.54	2.98	
$u_{\alpha} = 1.64$				$u_{\alpha} = 1.96$					$u_{\alpha} = 1.64$			

Oznaczenia zastosowane w Tabl. 1:

- $v_{\bar{s}r}$ – średnia prędkość [km/h],
- $b_{\bar{s}r}$ – średnie opóźnienie [m/s^2],
- $n(b)$ – liczebność opóźnień w danym sektorze,
- $a_{\bar{s}r}$ – średnie przyspieszenie [m/s^2],
- $n(a)$ – liczebność przyspieszeń w danym sektorze,
- t – czas przejazdu przez dany sektor [s],
- $n(t)$ – liczebność pomiarów czasów w danym sektorze,
- $\lambda(v)$ – wynik testu w odniesieniu do prędkości,
- $\lambda(a \text{ i } b)$ – wynik testu w odniesieniu do opóźnienia i przyspieszenia,
- $u(v)$ – wynik testu istotności dla dwóch średnich w odniesieniu do następujących po sobie wartości prędkości,
- $u(a \text{ i } b)$ – wynik testu istotności dla dwóch średnich w odniesieniu do opóźnienia lub przyspieszenia na kolejnych następujących po sobie sektorach.

Pikiety znajdujące się przed punktem zerowym oznaczano ze znakiem minus.

Znak (–) oznacza brak pomiarów przyspieszenia, ponieważ 80 autobusów hamowało lub 80 autobusów przyspieszało w danym sektorze.

W analizach wyznaczania długości wzmożonego oddziaływania autobusu na nawierzchnię najbardziej przydatnym testem statystycznym okazał się test zgodności Kołmogorowa-Smirnowa, którego podstawą jest zweryfikowanie, czy rozpatrywane populacje należą do tego samego zbioru i nie ma pomiędzy nimi istotnych statystycznie różnic. Przykładowe dystrybuanty przyspieszeń i opóźnień w wybranych sektorach badawczych przedstawiono na Rys. 4. Największe różnice w wielkości opóźnień czy przyspieszenia odnotowano w strefie zatrzymania i postoju oraz odjazdu, co wyraźnie było spowodowane warunkami ruchu na pobliskim skrzyżowaniu. Maksymalne opóźnienia odnotowane w strefie zatrzymania i postoju wynosiły ok. $-3 m/s^2$. Natomiast maksymalne przyspieszenia odnotowano w strefie odjazdu i zawierały się one w granicach $2,5-3,0 m/s^2$.

Uwzględniając, że wyniki analiz miały stanowić podstawę do określenia długości wzmożonego oddziaływania autobusu na nawierzchnię, na kilku wybranych ulicach wykonano pomiary prędkości autobusu w ruchu swobodnym na odcinkach pomiędzy skrzyżowaniami. Podczas jazdy autobusu w ruchu swobodnym odnotowano średnią prędkość równą $40-50 km/h$ i maksymalne przyspieszenie równe $0,4 m/s^2$ [25]. W odniesieniu do opóźnienia odnotowano większe wartości, nawet równe $-0,8 m/s^2$ [25], co prawdopodobnie związane było z chwilowymi warunkami na jezdni. Wyniki otrzymane w rejonie przystanków autobusowych wykazały, że siły poziome powstające na odcinkach wzmożonego oddziaływania autobusu na nawierzchnię w porównaniu do ruchu swobodnego są znacznie większe i mogą mieć duży wpływ na jej stan techniczny.

Symbols used in Table 1:

- v_{mean} – mean speed [km/h],
- b_{mean} – mean deceleration [m/s^2],
- $n(b)$ – number of decelerations in given sector,
- a_{mean} – mean acceleration [m/s^2],
- $n(a)$ – number of accelerations in given sector,
- t – duration of drive through given sector [s],
- $n(t)$ – number of time measurements in given sector,
- $\lambda(v)$ – test result for speed,
- $\lambda(a \text{ and } b)$ – test result for deceleration and acceleration,
- $u(v)$ – two-sample t-test results for consecutive speed values,
- $u(a \text{ and } b)$ – two-sample t-test result for deceleration or acceleration on consecutive sectors.

Height spots before zero point are denoted with minus sign..

The sign (–) means no acceleration measurements because 80 buses would brake or 80 buses would accelerate in given sector.

The two-sample K-S test, whose basic purpose was to verify whether the considered populations belonged to the same set and there were no statistically significant differences between them, was found to be the most useful statistical test in the analysis relating to the determination of the intensified bus impact on the pavement. Exemplary distribution functions of accelerations and decelerations in selected tested sectors are shown in Fig. 4. The largest differences in the magnitude of decelerations or accelerations were registered in the stop and stoppage zone and in the departure zone, which was clearly due to the traffic conditions at the nearby intersection. The maximum decelerations registered in the stop and stoppage zone amounted to about $-3 m/s^2$. The maximum accelerations were registered in the departure zone and amounted to $2.5-3.0 m/s^2$.

Considering that the results of the analysis were to constitute a basis for determining the length of the intensified bus impact on the pavement, measurements of bus speed in free flow traffic were carried out on stretches between intersections on several selected streets. During bus driving in free flow traffic the average speed of $40-50 km/h$ and the maximum acceleration of $0.4 m/s^2$ were registered [25]. Higher values, even as high as $-0.8 m/s^2$, were registered for decelerations [25], which was probably due to instantaneous conditions on the carriageway. The results registered in bus stop areas showed that the horizontal forces arising in the sections with an intensified bus impact on the pavement are considerably greater than the ones arising in free flow traffic and can adversely affect the condition of the pavement.

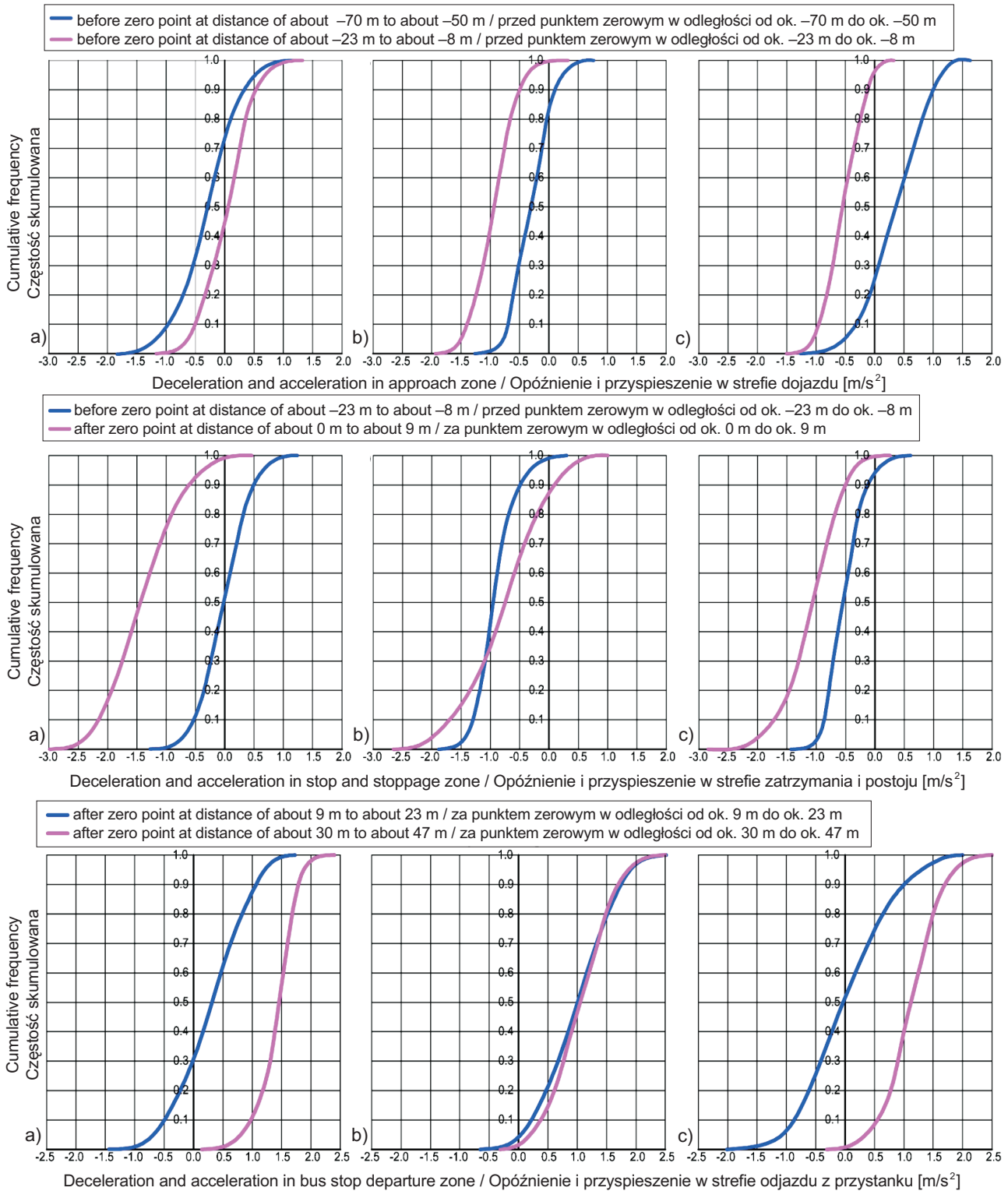


Fig. 4. Differences between deceleration and acceleration distribution functions in selected sectors: a) test site 1, b) test site 2, c) test site 3

Rys. 4. Różnice pomiędzy dystrybuantami opóźnienia i przyspieszenia w wybranych sektorach: a) poligon badawczy 1, b) poligon badawczy 2, c) poligon badawczy 3

Podobne spostrzeżenia odnośnie stanu eksploatacyjnego nawierzchni w rejonie przystanków sformułowano w pracach [14-16]. Biorąc powyższe rozważania pod uwagę, autorzy porównali wartości sił poziomych odnotowane w badaniach z odpowiadającymi im wartościami sił poziomych odnotowanymi w ruchu swobodnym. Przyjmując, że konstrukcja nawierzchni jezdni była projektowana przy przyjmowaniu niewielkich sił poziomych, odpowiadających ruchowi swobodnemu (tj. max. przyspieszeniu do $0,4 \text{ m/s}^2$), założono, że każda krotność zwiększonych wartości opóźnień czy przyspieszeń pozwoli określić odcinki wzmożonego oddziaływania obciążenia autobusu na nawierzchnię. Porównanie odnotowanych w badaniach wielkości opóźnień i przyspieszeń dało potwierdzenie założonej tezy, że niesłusznie siły poziome były pomijane przy wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni przystanków autobusowych. Zdaniem autorów przyjęta metoda analiz pozwoliła na zlokalizowanie sektorów, na których jedne autobusy hamowały, a inne przyspieszały, wobec czego nie było czasu na pełną relaksację nawierzchni. To właśnie nakładanie się wzmożenia niezrelaksowanych naprężeń może, zdaniem autorów, prowadzić do przyspieszonej degradacji nawierzchni, o której także wspomniano w [14-16].

Biorąc powyższe pod uwagę zaproponowano współczynnik wzrostu oddziaływania sił poziomych D liczony wg następującego wzoru [25, 26]:

$$D_i = \frac{F_{(a,b)i}}{F_f} = \frac{\frac{G}{g} |a_i \text{ lub } b_i|}{\frac{G}{g} |a=0,4 \text{ lub } b=-0,4|} = \frac{|a_i \text{ lub } b_i|}{0,4}, \quad (1)$$

gdzie:

$F_{(a,b)i}$ – pozioma siła przekazywana na nawierzchnię przy przyspieszaniu F_{ai} lub hamowaniu F_{bi} autobusu w kolejnych i -tych sektorach pomiarowych [kN],

F_f – pozioma siła przekazywana na nawierzchnię w ruchu swobodnym [kN],

$|a \text{ lub } b| = 0,4 \text{ m/s}^2$ – przyspieszenie a lub opóźnienie b w ruchu swobodnym,

$|a_i \text{ lub } b_i|$ – przyspieszenie lub opóźnienie w poszczególnych sektorach d_i .

Proponowaną metodę wyznaczenia odcinków wzmożonego oddziaływania sił poziomych na konstrukcję nawierzchni wzdłuż przejazdu autobusu przedstawiono na Rys. 5. W odniesieniu do współczynnika D zaproponowano następujące kryteria [25]:

- Nie jest potrzebne wzmocnienie konstrukcji nawierzchni w sektorach badawczych znajdujących się wzdłuż przystanku z oddziaływaniem obciążenia autobusu na nawierzchnię

Similar observations about the service condition of the pavement in bus stop areas were made in [14-16]. Considering the above, the present authors compared the horizontal force values registered in the bus stop areas with the ones registered in free flow traffic conditions. Assuming that the carriageway pavement structure was designed for small horizontal forces corresponding to free flow traffic (i.e. the max. acceleration of up to 0.4 m/s^2), it was concluded that any multiplicity of these deceleration or acceleration values would indicate sections with increased bus load impact on the pavement. A comparison of the registered deceleration and accelerations values confirmed the thesis that horizontal forces had been wrongly neglected in the dimensioning of bus stop pavement structures. Thanks to the adopted analytical method the sectors on which some buses would brake while other buses would accelerate, whereby there was no time for full pavement relaxation, could be identified. In the authors' opinion, the overlapping of unrelaxed stress intensifications can lead to the accelerated degradation of the pavement, which is also mentioned in [14-16].

$$D_i = \frac{F_{(a,b)i}}{F_f} = \frac{\frac{G}{g} |a_i \text{ or } b_i|}{\frac{G}{g} |a=0.4 \text{ or } b=-0.4|} = \frac{|a_i \text{ or } b_i|}{0.4}, \quad (1)$$

where:

$F_{(a,b)i}$ – a horizontal force transmitted onto the pavement at bus acceleration F_{ai} or braking F_{bi} in consecutive i -th measurement sectors [kN],

F_f – a horizontal force transmitted onto the pavement in free flow traffic [kN],

$|a \text{ or } b| = 0.4 \text{ m/s}^2$ – acceleration a or deceleration b in free flow traffic,

$|a_i \text{ or } b_i|$ – an acceleration or deceleration in individual sectors d_i .

The proposed method of identifying sections with an intensified impact of horizontal forces on the pavement structure along the bus drive through is shown in Fig. 5. As regards coefficient D , were proposed the following criteria [25]:

- It is not necessary to strengthen the pavement structure in the tested sectors situated along the bus stop, in which the bus load impact on the pavement was comparable with the impact registered for free flow traffic. In these sectors the values of coefficient D were in the range: $0.0 < D < 2.0$.
- Considering that during testing in free flow traffic several cases of deceleration equal to -0.8 m/s^2 (Fig. 5)

porównywalnym do oddziaływania odnotowanego w ruchu swobodnym. W tych sektorach wartości współczynnika wahały się w zakresie $0,0 < D < 2,0$.

- Biorąc pod uwagę, że w trakcie badań w ruchu swobodnym odnotowano kilka przypadków opóźnienia równego $-0,8 \text{ m/s}^2$ (Rys. 5), przyjęto, że mogą to być sektory ze zwiększonym oddziaływaniem obciążenia autobusu na konstrukcję nawierzchni drogowej. W tych sektorach wartości współczynnika D wahały się w zakresie $2,0 \leq D \leq 3,0$.
- Uwzględniając, że w niektórych sektorach wartości współczynników D były znacznie większe niż 3,0 (Rys. 5), przyjęto, że na ich długości następuje wzmożone oddziaływanie sił poziomych i wymagane jest na nich wzmocnienie konstrukcji nawierzchni.

were registered, it was assumed that these could be sectors with an increased bus load impact on the road pavement structure. In these sectors the values of coefficient D were in the range: $2.0 \leq D \leq 3.0$.

- Considering that in some sectors the values of coefficient D were considerably higher than 3.0 (Fig. 5), it was assumed that an intensified impact of horizontal forces occurs along their length and that the pavement structure in these sectors needs to be strengthened.

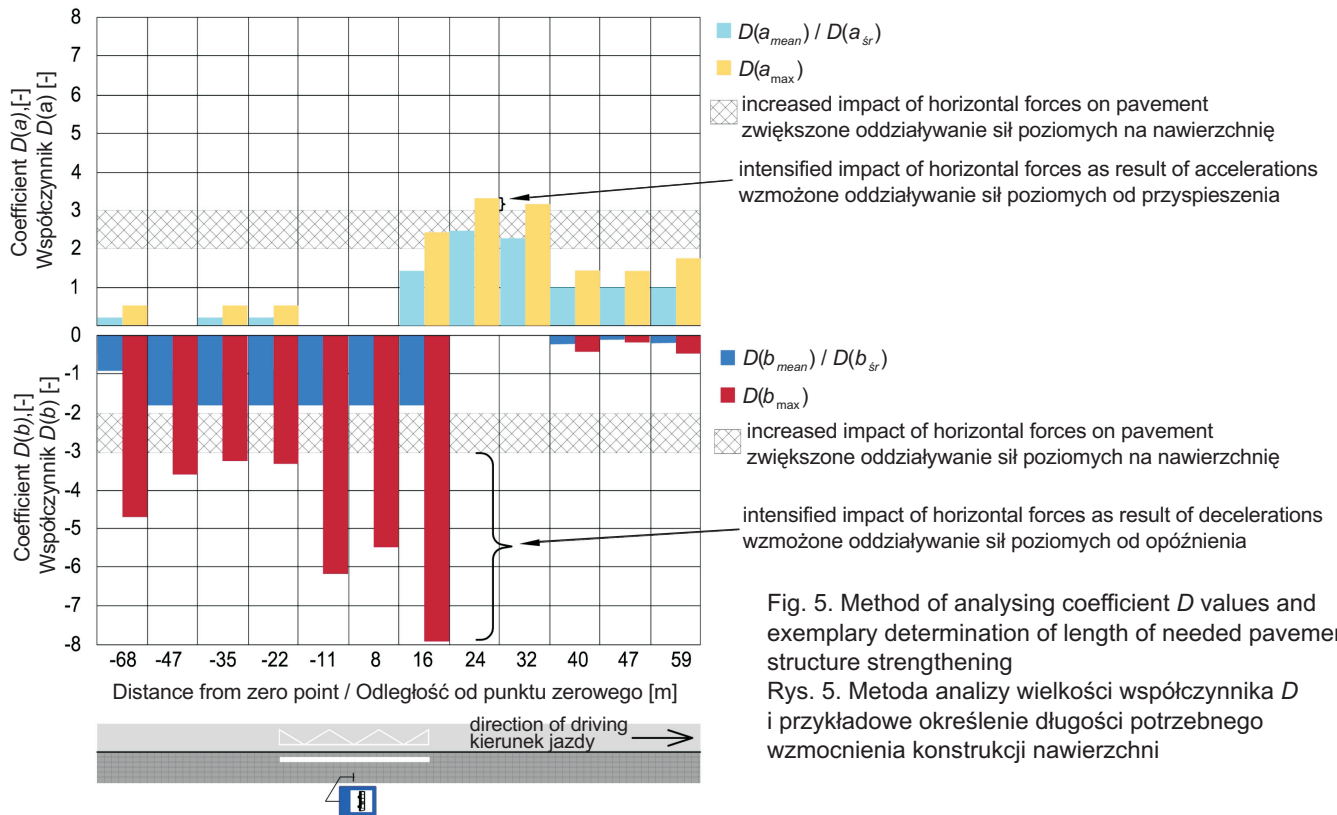


Fig. 5. Method of analysing coefficient D values and exemplary determination of length of needed pavement structure strengthening

Rys. 5. Metoda analizy wielkości współczynnika D i przykładowe określenie długości potrzebnego wzmocnienia konstrukcji nawierzchni

Kolejnym krokiem zastosowanej metody analizy było uwzględnienie w strefach hamowania lub przyspieszania wydłużonego czasu oddziaływania obciążenia autobusu na nawierzchnię t_i w stosunku do czasu oddziaływania obciążenia autobusu w ruchu swobodnym, przyjętego za równy $t_f = 0,02 \text{ s}$ wg [2]. Uwzględniając powyższe autorzy zaproponowali w dalszej analizie współczynnik wydłużenia czasu oddziaływania obciążenia autobusu na nawierzchnię T liczony wg wzoru (5) [25, 26]:

$$T_i = \frac{t_i}{t_f}, \quad t_i = \frac{t_z}{w}, \quad w = \frac{d_i}{c}, \quad (2)$$

The next step in the analysis was to take the longer time of the bus load impact on the pavement t_i in comparison with the bus impact time in free flow traffic t_f (assumed as equal to 0.02 s acc. to [2]) into account in the acceleration or deceleration zones. For this purpose the authors proposed to use the coefficient of the extended bus load impact on the pavement T calculated from the following formula [25, 26]:

$$T_i = \frac{t_i}{t_f}, \quad t_i = \frac{t_z}{w}, \quad w = \frac{d_i}{c}, \quad (2)$$

gdzie:

- t_i – czas oddziaływania obciążenia autobusu na nawierzchnię w i -tym sektorze pomiarowym [s],
- t_f – czas oddziaływania obciążenia równy 0,02 s (przyjęty według [2]),
- t_z – czas przejazdu autobusu przez i -ty sektor pomiarowy [s],
- w – liczba śladów odcisków kół autobusu na długości i -tego badanego sektora [-],
- d_i – długość i -tego sektora pomiarowego [m],
- c – długość styku opony autobusu z nawierzchnią, przyjęto $c = 0,20$ m.

Dyskusyjna może być długość styku opony autobusu z nawierzchnią. W projektowaniu konstrukcji nawierzchni metodą mechanistyczną według zaleceń sformułowanych w [27] powinno się stosować nacisk osi obliczeniowej 100 kN przy ciśnieniu kontaktowym między kołem a nawierzchnią $q = 0,65$ MPa. Obliczając stąd długość śladu opony otrzymuje się wartość 0,313 m. W badaniach przedstawionych w [28] wykazano, że ciśnienie w oponach, zatem i długość kontaktu opony z nawierzchnią, może mieć zasadniczy wpływ na odkształcenia nawierzchni na drogach mniejszego znaczenia. Natomiast w pracy [29], przy znanym ciśnieniu w oponie i długości śladu kół, zajęto się wyznaczeniem oporu toczenia opon autobusu i wykazano, że zmniejszony opór toczenia może mieć zasadniczy wpływ na obniżenie zużycia paliwa, na co wpływ może mieć konstrukcja opon, jak i skład mieszanki bieżnika. Inne podejście do określenia długości styku opony autobusu z nawierzchnią przedstawiono w pracy [30], w której opisano badania odkształcenia opon autobusu i nawierzchni, wykorzystując do tego modelowanie elementów skończonych i kolejno wprowadzając różne parametry stanu eksploatacyjnego nawierzchni. Na podstawie wykonanych badań autorzy pracy [30] wykazali, że największy wpływ na deformacje nawierzchni mają poprzeczne naprężenia kontaktowe, czyli odkształcenia pionowe i ścinające w nawierzchni asfaltowej. Te rozważania rozwinięto w pracy [29], wyznaczając miarodajne powierzchnie kontaktu opony z nawierzchnią przy różnych wartościach ciśnienia w oponach autobusu. Natomiast w pracy [31] autorzy wykazali, że miarodajna długość kontaktu krawędzi opon autobusu z nawierzchnią podczas jazdy autobusu jest równa 0,20 m.

Wobec wykazanych różnic w określeniu długości śladu koła autorzy przeprowadzili również własne pomiary długości odcisku kół stojących autobusów (Rys. 6), na podstawie których przyjęli długość styku opony autobusu z nawierzchnią podczas jazdy równą 0,2 m. Autobus w trakcie jazdy ma nieznacznie

where:

- t_i – the time of the bus load impact on the pavement in the i -th measurement sector [s],
- t_f – the bus load impact time equal to 0.02 s (assumed acc. to [2]),
- t_z – the time of bus drive through the i -th measurement sector [s],
- w – the number of bus wheel impressions along the length of the i -th tested sector,
- d_i – the length of the i -th measurement sector [m],
- c – the length of the bus tyre contact with the pavement, assumed as $c = 0.20$ m.

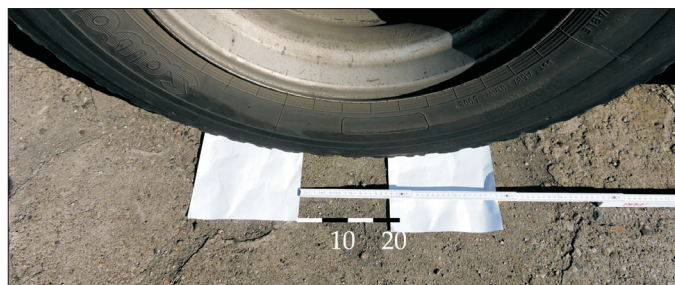
The length of the bus tyre contact with the pavement can be debatable. When designing a pavement structure using the mechanistic method in accordance with the recommendations formulated in [27], one should use the standard axle load of 100 kN at wheel-pavement contact pressure $q = 0.65$ MPa. Hence when calculating the length of the tyre track, one gets the value of 0.313 m. The investigations presented in [28] showed that tyre pressure, and so the length of the tyre-pavement contact, can have a major bearing on pavement deformations on secondary roads. In study [29], the rolling resistance of bus tyres at a known tyre pressure and wheel track length was investigated and it was found that a reduced rolling resistance can substantially contribute to fuel consumption reduction, depending on the tyre design and the tyre tread rubber composition. Another approach to the determination of the bus tyre-pavement contact length was presented in study [30], where investigations of bus tyre and pavement deformations are described using finite element modelling and introducing various pavement service condition parameters. On the basis their investigations the authors of [30] showed that transverse contact stresses, i.e. vertical and shear strains in the asphalt pavement, have the strongest effect on pavement deformations. These observations were elaborated in study [29], where representative tyre-pavement contact surfaces at different pressures in bus tyres were determined. In study [31] the representative bus tyre edge-pavement contact length during bus driving was found to be equal to 0.20 m.

Considering the above differences in the way of determining the wheel track length, the present authors carried out their own measurements of the length of the wheel tracks of standing buses (Fig. 6), and on basis of the measurement results they assumed the bus tyre-pavement contact length during driving to be equal to 0.2 m. During driving

mniejszą długość styku opony z nawierzchnią niż wykazana na Rys. 6 dla stojącego autobusu.



a)



b)

Fig. 6. Wheel track length of bus standing in stop and stoppage zone: a) front wheel track length 26 cm, b) middle and back wheel track length 18 cm

Rys. 6. Długość śladów kół stojącego autobusu w strefie zatrzymania i postoju: a) długość śladu koła przedniego 26 cm, b) długość śladu koła środkowego i tylnego 18 cm

Analiza czasu oddziaływania obciążenia autobusu na nawierzchnię została przedstawiona na Rys. 7. Uzyskane czasy przejazdu przez poszczególne sektory pomiarowe pozwoliły na oszacowanie wielkości współczynnika T , odnoszącego się do wydłużonego czasu oddziaływania obciążenia na konstrukcję nawierzchni. Analiza danych przedstawionych na Rys. 7 wykazała, że rzeczywisty potwierdzony w badaniach czas oddziaływania obciążenia na nawierzchnię jest znacznie większy niż przyjmowano to w dotychczasowych wytycznych [2]. W większości przypadków odnotowany czas przekraczał 7-9 krotnie czas równy 0,02 s, określony jako czas oddziaływania podczas jazdy autobusu w ruchu swobodnym. Powyższe wnioski dają więc możliwość oszacowania długości wzmożonego oddziaływania obciążenia na konstrukcję nawierzchni.

Przy analizie wartości współczynnika T przyjęto podobne kryteria jak przy współczynniku D [25]:

- Nie jest potrzebne wzmocnienie konstrukcji nawierzchni w sektorach badawczych ze względu na wydłużony czas oddziaływania obciążenia autobusu na nawierzchnię. W tych sektorach wartości współczynnika wahały się w zakresie $0,0 < T < 2,0$.
- Analiza wielkości współczynnika T w strefie dojazdu do przystanku wykazała, że można w odniesieniu do niej przyjąć wydłużony czas oddziaływania obciążenia autobusu na nawierzchnię w zakresie $2,0 \leq T \leq 3,0$.
- Biorąc pod uwagę, że szczególnie w rejonie zatrzymania autobusu wartości współczynników T były znacznie większe niż 3 (Rys. 7), przyjęto, że na tej długości następuje wzmożone oddziaływanie sił poziomych i wymagane jest na niej wzmocnienie konstrukcji nawierzchni.

the length of the bus tyre contact with the pavement is slightly shorter than the one shown in Fig. 6 for a standing bus.

An analysis of bus load impact-on-pavement time is shown in Fig. 7. On the basis of the determined times of drive through the particular measurement sectors it was possible to estimate the value of coefficient T representing the extended time of the bus load impact on the pavement structure. An analysis of the data presented in Fig. 7 shows that the actual (corroborated by the test results) bus load impact-on-pavement time is considerably longer than the one assumed in the previous guidelines [2]. In most cases, the registered time 7-9 times exceeded the time of 0.02 s specified as the impact time during bus driving in free flow traffic. Thanks to the above findings it is possible to estimate the length of the intensified impact on the pavement structure.

When analysing the values of coefficient T , similar criteria as for coefficient D were applied [25]:

- There was no need to strengthen the pavement structure in the tested sectors with regard to extended bus load impact-on-pavement time as the values of coefficient T in those sectors were in the range: $0.0 < T < 2.0$.
- An analysis of the values of coefficient T in the zone of approach to the bus stop showed that an extended bus load impact-on-pavement time in the range: $2.0 \leq T \leq 3.0$ could be assumed for this zone.
- Considering that particularly in the area where buses would stop the values of coefficient T were considerably higher than 3 (Fig. 7), it was assumed that an intensified impact of horizontal forces occurred along the length of this section and so the pavement structure needed to be strengthened there.

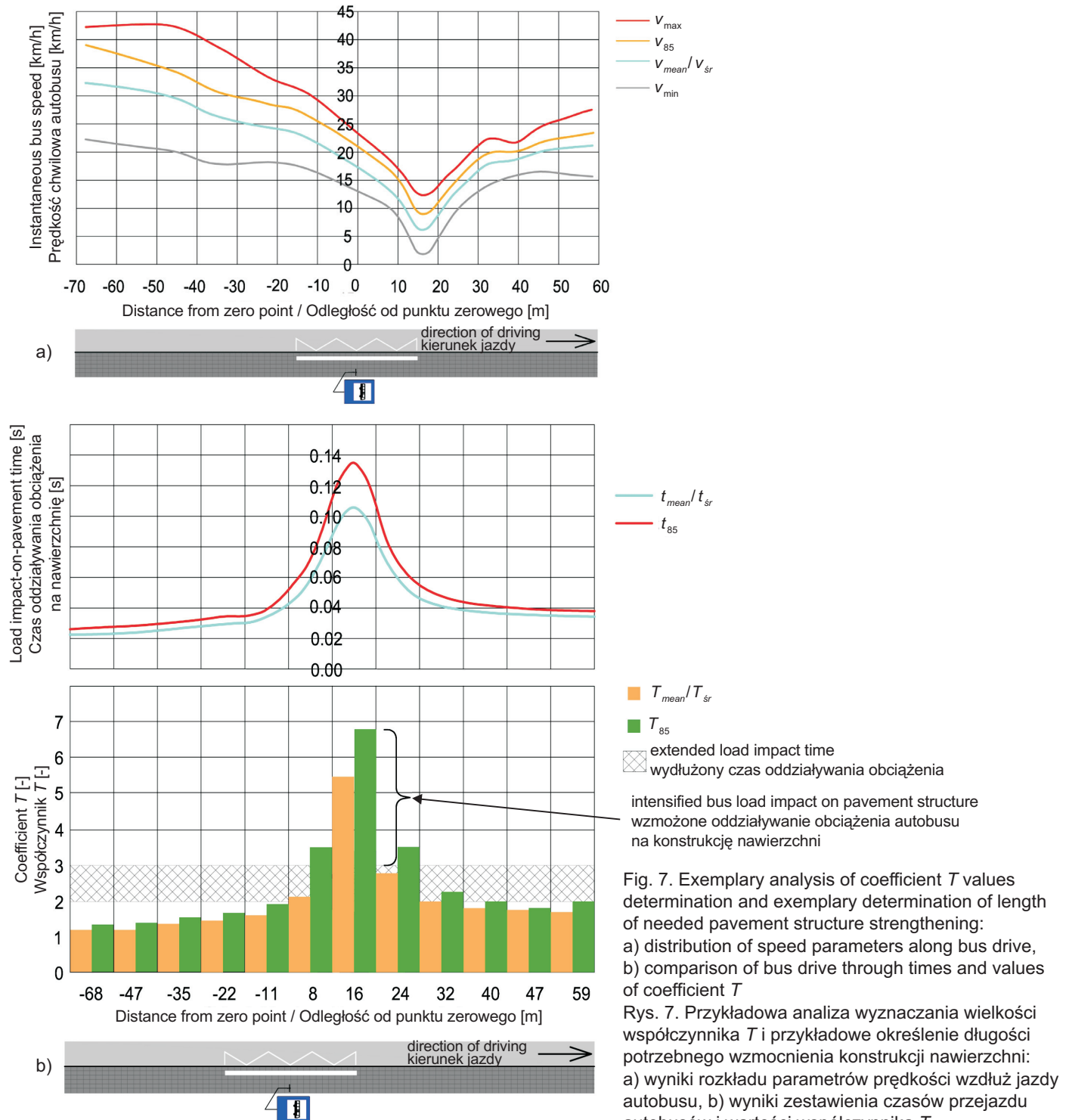


Fig. 7. Exemplary analysis of coefficient T values determination and exemplary determination of length of needed pavement structure strengthening: a) distribution of speed parameters along bus drive, b) comparison of bus drive through times and values of coefficient T

Rys. 7. Przykładowa analiza wyznaczania wielkości współczynnika T i przykładowe określenie długości potrzebnego wzmocnienia konstrukcji nawierzchni: a) wyniki rozkładu parametrów prędkości wzdłuż jazdy autobusu, b) wyniki zestawienia czasów przejazdu autobusów i wartości współczynnika T

W analizie statystycznej wykorzystano różne testy statystyczne w odniesieniu do wszystkich czterech analizowanych parametrów, m.in. także test jednorodności (tj. przynależności elementów skrajnych). Test jednorodności w wykonanych analizach okazał się niezmiernie istotny, szczególnie przy

Various statistical tests, including the test for extreme values, were applied to all the four analysed parameters. The test for extreme values proved to be highly useful, particularly when estimating the bus load impact-on-pavement

oszacowaniu czasu oddziaływania obciążenia autobusu na nawierzchnię, z uwagi na możliwy fakt zatrzymania się jakiegoś autobusu bardzo blisko punktu skrajnego danego sektora, np. 1 m lub mniej od niego. Wówczas odczytany czas mógłby być obciążony błędem grubym, co wynikałoby z testu jednorodności. Np. z pomierzonych czasów przykładowo 80 autobusów otrzymano dwa czasy równe $t_{79} = 0,11$ s i $t_{80} = 0,26$ s. W odniesieniu do wskazanych przykładowych danych w przeprowadzonym teście jednorodności stwierdzono, że wynik osiemdziesiątego autobusu jest obciążony grubym błędem i w dalszej analizie należy go pominąć. Przykładowe wyniki testu jednorodności w odniesieniu do czasów przejazdu przedstawiono w Tabl. 2. W odniesieniu do wartości minimalnej wyniki testu wykazują brak błędu grubego, a w odniesieniu do maksymalnej wartości czasu wynik testu wskazuje, że w sektorze nr 6 czas przejazdu jednego autobusu należy w dalszych analizach pominąć.

time because of the probability of a bus stopping very close to the end of a given sector, e.g. 1 m or less from it. Then the read off time could be affected by a gross error, which the test for extreme values would indicate. For instance, among the measured times for, e.g., 80 buses there were two times: $t_{79} = 0.11$ s and $t_{80} = 0.26$ s. The test for extreme values carried out for the data showed that the result for the 80th bus was affected by a gross error and so should be dropped from further analysis. Exemplary results of the test for extreme values, applied to drive through times are presented in Table 2. For the minimum value the test result indicates no gross error, whereas for the maximum value the test result indicates that in sector no. 6 the drive through of one bus should be omitted in further analyses.

Table 2. Results of test for extreme values as applied to exemplary single bus stop located between intersections – test site 1

Tablica 2. Zestawienie wyników na przykładowym pojedynczym przystanku autobusowym, zlokalizowanym pomiędzy skrzyżowaniami – poligon badawczy 1

Sector no. Nr sektora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Test for extreme values (elimination of gross error) as applied to lowest value of time t Test jednorodności (eliminacji błędu grubego), dotyczący wartości najmniejszej czasu t												
$Q_{\alpha} = 0.05$	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376
Q	0.052	0.084	0.023	0.061	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.136	0.130	0.040
Result Wynik	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego
No. of bus to be omitted Nr autobusu do pominięcia	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Test for extreme values (elimination of gross error) as applied to highest value of time t Test jednorodności (eliminacji błędu grubego), dotyczący wartości największej czasu t												
$Q_{\alpha} = 0.05$	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376
Q	0.141	0.027	0.283	0.354	0.213	0.510	0.187	0.079	0.078	0.070	0.029	0.067
Result Wynik	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	gross error gruby błąd	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego	no gross error brak błędu grubego
No. of bus to be omitted Nr autobusu do pominięcia	–	–	–	–	–	80	–	–	–	–	–	–

5. DYSKUSJA

Przedstawioną powyżej metodę analizy wyników przyspieszeń, opóźnień i czasów zastosowano w odniesieniu do wszystkich poligonów badawczych. W Tabl. 3 przedstawiono

5. DISCUSSION

The above method of analysing acceleration, deceleration and drive through time results was applied to all the test sites. Table 3 shows exemplary results of an analysis of

przykładowe zestawienie wyników analiz zaproponowanych współczynników D i T w odniesieniu do bazy danych z poligonu badawczego 3. Kolorami jasnoszarym i ciemnoszarym oznaczono sektory, w których odnotowano wydłużone oddziaływanie obciążenia autobusu na nawierzchnię (T lub D w zakresie 2-3) i odpowiednio wzmożone oddziaływanie na nawierzchnię (T lub D większe niż 3). Ze względu na różne długości poszczególnych sektorów pomiarowych na każdym z wybranych przystanków niestety nie można połączyć w jednej tabeli wyników z wszystkich przystanków z każdego poligonu badawczego. Długości sektorów badawczych zawsze były zależne od warunków lokalnych w otoczeniu przystanku i możliwości wyznaczenia linii wzroku obserwatora zgodnie z Rys. 2. Uwzględniając powyższe informacje w Tabl. 3 przedstawiono przykładowe wyniki z jednego przystanku.

Table 3. Results for exemplary single bus stop located before unsignalized intersection – test site 3

Tablica 3. Zestawienie wyników na przykładowym pojedynczym przystanku autobusowym, zlokalizowanym przed skrzyżowaniem bez sygnalizacji świetlnej – poligon badawczy 3

Spot height / Pikieta	Sektory pomiarowe przed punktem zerowym Measurement sector before zero point					Measurement sectors after zero point Sektory pomiarowe za punktem zerowym						
	-68.84	-50.91	-38.20	-24.55	-12.76	7.50	17.72	26.91	35.26	44.71	54.48	69.05
Sector no. / Nr sektora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t_{mean} / t_{sr}	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.11	0.09	0.04	0.03	0.03	0.02
t_{85}	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.15	0.13	0.04	0.03	0.03	0.03
T_{mean} / T_{sr}	0.95	1.04	1.16	1.34	1.53	2.26	5.53	4.29	1.77	1.45	1.27	1.14
T_{85}	1.06	1.15	1.28	1.47	1.73	2.56	7.55	6.43	2.02	1.60	1.42	1.30
b_{mean} / b_{sr}	-0.6	-0.7	-0.8	-0.6	-1.1	-1.3	-0.9	-0.7	-	-	-	0.0
b_{85}	-0.9	-0.9	-1.2	-0.8	-1.5	-1.6	-1.1	-1.1	-	-	-	-0.1
$D_{mean}(b) / D_{sr}(b)$	1.4	1.7	1.9	1.5	2.9	3.1	2.2	1.8	-	-	-	0.1
$D_{85}(b)$	2.3	2.3	3.1	2.0	3.8	3.9	2.8	2.8	-	-	-	0.1
a_{mean} / a_{sr}	-	-	-	-	-	-	0.8	1.0	1.3	1.0	0.7	0.6
a_{85}	-	-	-	-	-	-	1.2	1.3	1.9	1.4	1.3	0.9
$D_{mean}(a) / D_{sr}(a)$	-	-	-	-	-	-	2.0	2.4	3.3	2.5	1.8	1.4
$D_{85}(a)$	-	-	-	-	-	-	3.0	3.1	4.7	3.4	3.2	2.3

W dalszych analizach autorzy zastosowali kompilację sum długości sektorów badawczych na każdym z przystanków w danym poligonie badawczym, znajdujących się przed i za punktem zerowym, na których potwierdzono wzmożone oddziaływanie autobusu na nawierzchnię, tzn. gdy zaproponowane współczynniki D i T miały wartość większą niż 3 wg następujących wzorów:

- dla sektorów badawczych przed punktem zerowym

$$\sum_{\max} d_{ijl} \text{ (gdzie } D_i > 3 \text{ i } T_i > 3),$$

- dla sektorów badawczych za punktem zerowym

$$\sum_{\max} d_{ijp} \text{ (gdzie } D_i > 3 \text{ i } T_i > 3),$$

$$L_{\max} = \sum_{\max} d_{ijl} + \sum_{\max} d_{ijp} \text{ (gdzie } D_i > 3 \text{ i } T_i > 3),$$

proposed coefficients D and T for the data obtained from test site 3. Sectors in which an extended bus load impact on the pavement (T or D amounting to 2-3) or an intensified bus load impact on the pavement (T or D higher than 3) was registered are marked light grey and dark grey, respectively. Unfortunately, since the selected bus stops differed in the length of their individual measurement sectors it was not possible to collect the results for all the bus stops on each of the test sites in one table. The lengths of the tested sectors always depended on the local conditions in the vicinity of the bus stop and on the possibility of ensuring the observer's line of vision in accordance with Fig. 2. Taking the above into account, exemplary results from one bus stop are shown in Table 3.

In further analyses the authors compiled the sums of the lengths of the tested sectors (located before and after the zero point) at each bus stop on a given test site, along which an intensified bus impact on the pavement was corroborated (the values of proposed coefficients D and T were found to be higher than 3), using the following formulas:

- for tested sectors before zero point

$$\sum_{\max} d_{ijl} \text{ (where } D_i > 3 \text{ and } T_i > 3),$$

- for tested sectors after zero point

$$\sum_{\max} d_{ijp} \text{ (where } D_i > 3 \text{ and } T_i > 3),$$

$$L_{\max} = \sum_{\max} d_{ijl} + \sum_{\max} d_{ijp} \text{ (where } D_i > 3 \text{ and } T_i > 3),$$

- dla sektorów badawczych przed punktem zerowym

$$\sum_{85} d_{ijl} \text{ (gdzie } D_i > 3 \text{ i } T_i > 3),$$

- dla sektorów badawczych za punktem zerowym (4)

$$\sum_{85} d_{ijp} \text{ (gdzie } D_i > 3 \text{ i } T_i > 3),$$

$$L_{85} = \sum_{85} d_{ijl} + \sum_{85} d_{ijp} \text{ (gdzie } D_i > 3 \text{ i } T_i > 3),$$

- dla sektorów badawczych przed punktem zerowym

$$\sum_{sr} d_{ijl} \text{ (gdzie } D_i > 3 \text{ i } T_i > 3),$$

- dla sektorów badawczych za punktem zerowym (5)

$$\sum_{sr} d_{ijp} \text{ (gdzie } D_i > 3 \text{ i } T_i > 3),$$

$$L_{sr} = \sum_{sr} d_{ijl} + \sum_{sr} d_{ijp} \text{ (gdzie } D_i > 3 \text{ i } T_i > 3).$$

gdzie:

$\sum_{\max} d_{ijl}$ – maksymalna suma długości sektorów badawczych i -tych, znajdujących się przed punktem zerowym, na j -tym przystanku z danego poligonu badawczego [m],

$\sum_{\max} d_{ijp}$ – maksymalna suma długości sektorów badawczych i -tych, znajdujących się za punktem zerowym, na j -tym przystanku z danego poligonu badawczego [m],

$\sum_{85} d_{ijl}$ – kwantyl 85% sumy długości sektorów badawczych i -tych, znajdujących się przed punktem zerowym, na j -tym przystanku z danego poligonu badawczego [m],

$\sum_{85} d_{ijp}$ – kwantyl 85% długości sektorów badawczych i -tych, znajdujących się za punktem zerowym, na j -tym przystanku z danego poligonu badawczego [m],

$\sum_{sr} d_{ijl}$ – średnia sumy długości sektorów badawczych i -tych znajdujących się przed punktem zerowym, na j -tym przystanku z danego poligonu badawczego [m],

$\sum_{sr} d_{ijp}$ – średnia sumy długości sektorów badawczych i -tych, znajdujących się za punktem zerowym, na j -tym przystanku z danego poligonu badawczego [m].

Otrzymane łączne sumy długości L sektorów badawczych przed i za punktem zerowym (wielkości: L_{\max} maksymalne, L_{85} kwantyl 85% i L_{sr} średnie), na których otrzymano wartości współczynników D i T większe od 3 na analizowanych przystankach w poszczególnych poligonach badawczych porównywano następnie z oceną ich stanu eksploatacyjnego nawierzchni w rejonie przystanku. Porównanie sumy długości sektorów przed i za punktem zerowym ze stanem eksploatacyjnym nawierzchni pozwoliło przyjąć, że najbardziej miarodajnym

- for tested sectors before zero point

$$\sum_{85} d_{ijl} \text{ (where } D_i > 3 \text{ and } T_i > 3),$$

- for tested sectors after zero point (4)

$$\sum_{85} d_{ijp} \text{ (where } D_i > 3 \text{ and } T_i > 3),$$

$$L_{85} = \sum_{85} d_{ijl} + \sum_{85} d_{ijp} \text{ (where } D_i > 3 \text{ and } T_i > 3),$$

- for tested sectors before zero point

$$\sum_{mean} d_{ijl} \text{ (where } D_i > 3 \text{ and } T_i > 3),$$

- for tested sectors after zero point (5)

$$\sum_{mean} d_{ijp} \text{ (where } D_i > 3 \text{ and } T_i > 3),$$

$$L_{mean} = \sum_{mean} d_{ijl} + \sum_{mean} d_{ijp} \text{ (where } D_i > 3 \text{ and } T_i > 3).$$

where:

$\sum_{\max} d_{ijl}$ – the maximum sum of the lengths of the i^{th} sectors located before the zero point at the j^{th} bus stop within a given test site [m],

$\sum_{\max} d_{ijp}$ – the maximum sum of the lengths of the i^{th} sectors located after the zero point at the j^{th} bus stop within a given test site [m],

$\sum_{85} d_{ijl}$ – the 85% quantile of the sum of the lengths of the i^{th} tested sectors located before the zero point at the j^{th} bus stop within a given test site [m],

$\sum_{85} d_{ijp}$ – the 85% quantile of the sum of the lengths of the i^{th} tested sectors located after the zero point at the j^{th} bus stop within a given test site [m],

$\sum_{mean} d_{ijl}$ – the mean of the sum of the lengths of the i^{th} tested sectors located before the zero point at the j^{th} bus stop within a given test site [m],

$\sum_{mean} d_{ijp}$ – the mean of the sum of the lengths of the i^{th} tested sectors located after the zero point at the j^{th} bus stop within a given test site [m].

The obtained total sums of lengths L of the tested sectors before and after the zero point (quantities: L_{\max} (maximum), L_{85} (85% quantile) and L_{mean} (mean)), along which coefficient D and T values at the analysed bus stops on the particular test sites were found to be higher than 3 were then compared with the assessments of the condition of their pavement within the bus stop area. The comparison of the sum of the lengths of the sectors before and after the zero point with the service condition of the pavement showed that the most reliable indicator of the length of the section of an intensified bus load impact on the pavement would be the mean values of the sums, calculated from

wyznacznikiem długości odcinka wzmożonego oddziaływania obciążenia autobusu na nawierzchnię będą wartości średnie sum wyliczone wg wzoru (5). Przy takim złożeniu otrzymywano prawie we wszystkich przypadkach dużą zgodność pomiędzy rozpatrywanymi parametrami warunków ruchu i stanem eksploatacyjnym nawierzchni. Pojedyncze rozbieżności pomiędzy porównywanymi parametrami wskazywały na chwilowe lokalne niekorzystne warunki ruchowe, tj. zwalnianie pojazdów jadących przed autobusem (np. przed skrzyżowaniem), powstające korki itd. Powyższe spostrzeżenia weryfikowano zawsze z nagraniami pomiarów na kamerze video w celu potwierdzenia ewentualnej nietypowej sytuacji ruchowej.

W odniesieniu do wyników przeprowadzonych badań na przystankach z poligonu badawczego 1, tj. przystanków znajdujących się pomiędzy skrzyżowaniami, stwierdzono, że wzmożone oddziaływanie obciążenia autobusu na nawierzchnię (i potrzeba zastosowania innej konstrukcji nawierzchni) występuje na długości równej co najmniej 40 m, tj. od -10 m przed punktem zerowym i do 30 m za punktem zerowym. Odnotowano podczas pomiarów tylko kilka przypadków zatrzymania się autobusu poza tym obszarem i można to przypisać wpływom czynników losowych, tj. związanych z nietypową sytuacją ruchową na jezdni.

W odniesieniu do wyników badań przeprowadzonych na przystankach z poligonu badawczego 2, tj. przystankach znajdujących się w pobliżu skrzyżowania z sygnalizacją świetlną na ulicach dwujezdniowych, otrzymano trzy różne przypadki. Jeśli przystanek znajduje się w odległości 60-100 m od osi skrzyżowania, długość wzmożonego oddziaływania wynosi 70 m, z niesymetrycznym podziałem względem przyjętego punktu zerowego (tj. -20 m przed punktem zerowym i 50 m za punktem zerowym). Wydłużenie tego odcinka wynika z innych warunków ruchu i konieczności zmiany pasa ruchu jeszcze przed skrzyżowaniem. Jeśli natomiast przystanek znajduje się za skrzyżowaniem w odległości 60-80 m od jego osi, to długość wzmożonego oddziaływania wynosi 50 m, z niesymetrycznym podziałem względem przyjętego punktu zerowego (tj. -20 m przed punktem zerowym i 30 m za punktem zerowym). W przypadku, gdy przystanek znajduje się za skrzyżowaniem w odległości ok. 120-160 m od jego osi, to długość wzmożonego oddziaływania wynosi 75 m, z podziałem -40 m przed punktem zerowym i 25 m za punktem zerowym. Wydłużenie tego odcinka wynika z innych warunków ruchu na jezdni dwupasowej lub trzypasowej i ewentualnej zmianie pasa ruchu przed i za przystankiem.

W odniesieniu do wyników badań przeprowadzonych na przystankach z poligonu badawczego 3, tj. przystankach znajdujących się w pobliżu skrzyżowania zwykłego bez

formuła (5). Under this assumption good agreement between the considered parameters of traffic conditions and the service condition of the pavement was obtained. Isolated divergences between the compared parameters would indicate instantaneous unfavourable local traffic conditions, i.e. vehicles driving ahead of the bus would slow down (e.g. before an intersection), traffic jams would form, etc. The above observations each time were verified through reference to the video camera recordings of the measurements to confirm whether an atypical traffic situation actually occurred.

As regards the results of the tests carried out at the bus stops on test site 1, i.e. bus stops located between intersections, it was found that an intensified bus load impact on the pavement (and the need to use a different pavement structure) occurred along the length of at least 40 m, i.e. from -10 m before the zero point to 30 m after the zero point. Only a few cases of bus stopping beyond this area were noted, which can be ascribed to random factors, i.e. connected with an atypical traffic situation on the carriageway.

As regards the results of the tests carried out at the bus stops on test site 2, i.e. bus stops located on dual carriageway streets near a signalized intersection, three different cases are distinguished. If the bus stop is located at the distance of 60-100 m from the axis of the intersection, the length of the intensified impact amounts to 70 m, with an asymmetric division relative to the assumed zero point (i.e. -20 m before the zero point and 50 m after the zero point). The lengthening of this section is due to the different traffic conditions and the necessity of changing the traffic lane already before the intersection. If the bus stop is located after the intersection at the distance of 60-80 m from its axis, the length of the intensified impact amounts to 50 m, with an asymmetric division relative to the zero point (i.e. -20 m before the zero point and 30 m after the zero point). When the bus is located after the intersection at the distance of about 120-160 m from its axis, the length of the intensified impact amounts to 75 m, with a division: -40 m before the zero point and 25 m after the zero point. The lengthening of this section is due to the different traffic conditions on the two-lane or three-lane carriageway and a possible traffic lane change before and after the bus stop.

As regards the results of the tests carried out on the bus stops on test site 3, i.e. bus stops located near an ordinary unsignalized intersection, two different cases are distinguished. When the bus stop is located before the intersection at the distance of 100-120 m from its axis, an

sygnalizacji świetlnej, wyróżniono dwa różne przypadki. Jeśli przystanek znajdował się przed skrzyżowaniem w odległości 100-120 m od jego osi, to stwierdzono, że wzmożone oddziaływanie obciążenia autobusu na nawierzchnię i zastosowanie innej konstrukcji nawierzchni następuje na długości równej co najmniej równej 30 m, tj. od -15 m przed punktem zerowym do 15 m za punktem zerowym. Natomiast jeśli przystanek znajdował się przed skrzyżowaniem, w odległości do 60 m od jego osi, to stwierdzono, że wzmożone oddziaływanie obciążenia autobusu na nawierzchnię (i potrzeba zastosowania innej konstrukcji nawierzchni) zachodzi na długości co najmniej równej 40 m, tj. od -15 m przed punktem zerowym i do 25 m za punktem zerowym. Związane to było z trudniejszymi warunkami ruchowymi możliwymi na skrzyżowaniu (tj. ustąpieniem pierwszeństwa przejazdu, kolejką pojazdów przed skrzyżowaniem itp.) i ewentualnym ruchem pieszych na przejściach dla pieszych.

6. WNIOSKI

Analiza przedstawionych wyników badań przyczyniła się do sformułowania następujących wniosków:

1. Długość odcinka wzmożonego oddziaływania obciążeń zewnętrznych jest większa niż zwyczajowo przyjmowana w Polsce długość krawędzi peronowej pojedynczego przystanku, równa 20 m. Faktyczna długość wzmożonego oddziaływania ruchu autobusów jest znacznie wyższa i zależy m.in. od lokalizacji przystanku względem skrzyżowania oraz od liczby pasów ruchu na jezdni przyległej do przystanku.
2. Wzmacniając konstrukcję nawierzchni na długości oszacowanej w artykule w zależności od lokalizacji danego przystanku względem najbliższego skrzyżowania, otrzymano dłuższe okresy jej eksploatacji.
3. Na długościach wzmożonego oddziaływania autobusu na nawierzchnię określonych wg zaproponowanej metody stwierdzono również wzmożone uszkodzenia nawierzchni (wg metody opisanej w pracy [23]). Otrzymane wyniki oceny stanu technicznego nawierzchni na przystankach potwierdzają przedstawione w pracach [14-16] wnioski, że istnieje odcinek ulicy w rejonie przystanku, na którym następuje wzmożone oddziaływanie autobusu na eksploatowaną nawierzchnię.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania, których wyniki przedstawiono w artykule, były częściowo finansowane z grantu dziekańskiego Wydział Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie Dziekańska Kadra Doktorska WBiA ZUT DKD No. 517-02-033-7389/17.

intensified bus load impact on the pavement (and so the necessity to use a different pavement structure) occurs along the length of at least 30 m, i.e. from -15 m before the zero point to 15 m after the zero point. When the bus stop is located before the intersection at the distance of up to 60 m from its axis, an intensified bus load impact on the pavement (and so the need to use a different pavement structure) occurs along the length of at least 40 m, i.e. from -15 m before the zero point to 25 m after the zero point. This is due to possible more difficult traffic conditions at the intersection (i.e. yielding the right of way, a queue of vehicles before the intersection, etc.) and to possible pedestrian traffic on the pedestrian crossings.

6. CONCLUSIONS

The analysis of the presented test results contributed to the formulation of the following conclusions:

1. The length of the section impacted by external loads is longer than the length of the platform edge of a single bus stop, customarily assumed in Poland as equal to 20 m. The actual length of the intensified impact of bus traffic is considerably longer and depends on, i.a., the location of the bus stop relative to the intersection and on the number of traffic lanes on the carriageway adjoining the bus stop.
2. By strengthening the pavement structure along the length estimated in this paper depending on the location of a given bus stop relative to the nearest intersection one achieved a longer service life of this pavement structure.
3. Intensified pavement distresses were also found (using the method described in [23]) along the lengths of the intensified bus impact on the pavement determined using the proposed method. The results of the assessment of pavement condition at the bus stops confirm the conclusions presented in papers [14-16] that in the bus stop area there is a street section on which an intensified bus impact on the used pavement occurs.

ACKNOWLEDGEMENT

The research the results of which are presented in this paper was partially funded by the grant from the Dean of the Faculty of Civil Engineering and Architecture at West Pomeranian University of Technology in Szczecin, Dean's Doctoral Personnel WBiA ZUT DKD No. 517-02-033-7389/17.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDP, Warszawa 1997
- [2] Rozporządzenie MTiGM z dnia 02.03.1999 r. w sprawie „warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie”. Dziennik Ustaw nr 43 poz. 430: 1999
- [3] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDKiA, Warszawa, 2014
- [4] Traffic areas in the city Booklet No. 9, Area for parking and stopping. Vejdirektoratet, København, 2000
- [5] Københavns Kommune: Højklasset busløsning og cykelsupersti på frederikssundsvej. Rapport 1100002698 Bilag 1. København 2013, <https://www.kk.dk/sites/default/files/edoc/c9ac0-851-ead6-4416-99d6-d53cd1fcf87f/6651992-7-8e7c-4a13-a7f0-893a174464d8/Attachments/10355996-10129723-1.PDF>, 30.06.2021
- [6] Directives for the Design of Urban Roads RAS 06. Road and Transportation Research Association FGSV, Köln, 2006
- [7] Leitfaden für die Anlage von Bushaltestellen LF / Haltestelle / V02. Tirol User Land, Verkersplanung, Innsbruck, 2009, https://www.tirol.gv.at/fileadmin/themen/verkehr/verkehrsplanung/downloads/lf_haltestelle_v02.PDF, 30.06.2021
- [8] Bus Infrastructure Design Guidelines. Trans Link, Vancouver, 2018, https://www.translink.ca/-/media/translink/documents/plans-and-projects/managing-the-transit-network/bus_infrastructure_design_guidelines-sept_2018.pdf, 12.01.2019, 30.06.2021
- [9] Septa Bus Stop Design Guidelines. Department of Transportation's Federal Highway Administration (FHWA) and Federal Transit Administration (FTA), Pennsylvania & New Jersey, 2012, https://nacto.org/docs/usdg/septa_bus_stop_design_guidelines_delaware_valley.pdf, 12.03.2020
- [10] Bus Stop Design Guidelines. Riverside Transit Agency (RTA), California, Los Angeles, 2015, https://www.riversidetransit.com/images/DOWNLOADS/PUBLICATIONS/DESIGN_GUIDE%20S/Design%20Guidelines%20-%20Aug%202015.pdf, 20.01.2020
- [11] Accessible bus stop design guidance. Published by Transport for London, London, 2017, <http://content.tfl.gov.uk/bus-stop-design-guidance.pdf>, 12.02.2019
- [12] Qiang J.L., Wang K.C.P., Qiu S., Zhang Z., Moravec M.: Development of simplified traffic loading for secondary road pavement design. International Journal of Pavement Engineering, **16**, 2, 2015, 97-104, DOI: 10.1080/10298436.2014.926446
- [13] Witun Z.: Zarys geotechniki. WKŁ, Warszawa, 1987
- [14] Boile M., Narayanan P., Ozbay K.: Impact of Buses on Highway Infrastructure: Case Study for New Jersey State. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, **1841**, 1, 2003, 32-40, DOI: 10.3141/1841-04
- [15] Dreyer W., Steyn W.: Evaluation of the effect of deteriorating riding quality on bus-pavement interaction. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, **57**, 3(1116), 2015, 2-8, DOI: 10.17159/2309-8775/2015/v57n3a1
- [16] Fekpe E.: Pavement damage from transit buses and motor coaches. Energy, Transportation and Environment Division. Battelle Memorial Institute, Columbus, 2003, <https://hvtforum.org/wp-content/uploads/2019/11/Pavement-Damage-from-Transit-Buses-and-Motor-Coaches-Fekpe.pdf>, 20.07.2021
- [17] Gibby R., Dawson R., Sebaaly P.: Local Urban Transit Bus Impact on Pavements. Journal of Transportation Engineering, **122**, 3, 1996, online DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:3(215)
- [18] Johnston A.G., Lakkavalli V., Sharma V.: Meeting the Unique Challenges of Pavements Engineering in the Urban Context, City of Calgary. Conference Innovations in Pavement Management, Engineering and Technologies Session, Calgary 2017, https://www.tac-atc.ca/sites/default/files/conf_papers/johnstona-meeting_the_unique_challenges_of_pavements_engineering_in_the_urban_context_the_city_of_calgary.pdf, 15.06.2021
- [19] Ghosh S., Sengupta R.A., Kaliske M.: Prediction of rolling resistance for truck bus radial tires with nanocomposite based tread compounds using finite element simulation. Rubber Chemistry and Technology, **87**, 2, 2014, 276-290, DOI: 10.5254/rct.13.87901
- [20] Theron R.: Pavement Cost Impact Assessment from Increased Axle Loads on 2 and 3-Axle Buses and Trucks. Infrastructure Decision Support, Wellington, 2016, <https://www.nzta.govt.nz/assets/About-us/docs/Consultations/2016/NZTA-Pavement-Cost-Impact-from-Increased-BUS-TRUCK-Axle-Loads-.pdf>, 30.06.2021
- [21] Sołowczuk A., Gardas P.: The proposed assessment method of pavement condition at bus bays and bus stops. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **12**, 4, 2013, 425-439, DOI: 10.7409/rabdim.013.027
- [22] Korzyński M.: Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych. PWN, Warszawa, 2017
- [23] Sołowczuk A., Gardas P., Schab M.: Efficiency repair and maintenance works at bus bays and bus stops. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **13**, 2, 2014, 157-166, DOI: 10.7409/rabdim.014.011
- [24] Taylor J.R.: Wstęp do analizy błęd pomiarowego. PWN, Warszawa, 2011

- [25] *Gardas P.*: Wpływ lokalizacji przystanku autobusowego oraz warunków ruchu na długość wzmocnienia konstrukcji nawierzchni. rozprawa doktorska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, 2017
- [26] *Gardas P., Sołowczuk A.*: Wpływ lokalizacji przystanku autobusowego na długość wzmocnienia konstrukcji nawierzchni na podstawie analizy warunków ruchu. XXVI Konferencja Awarie budowlane'2013, Międzyzdroje, 2013, 915-922, http://www.awarie.zut.edu.pl/files/ab2013/referaty/08_Mosty_i_drogi/02_Gardas_P_i_inni_Wplyw_lokalizacji_przystanku_autobusowego_na_dlugosc_wzmocnienia_konstrukcji_nawierzchni_na_podstawie_analzy_warunkow_ruchu.pdf, 30.08.2013
- [27] Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDiM, Warszawa, 2001
- [28] *Douglas R.A., Woodward D., Woodside A.R.*: Road contact stresses and forces under tires with low inflation pressure. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **27**, 6, 2011, 1248-1258, DOI: 10.1139/cjce-27-6-1248
- [29] *Guo M., Li X., Ran M., Zhou X., Yan Y.*: Analysis of Contact Stresses and Rolling Resistance of Truck-Bus Tyres under Different Working Conditions. *Sustainability*, **12**(24), 2020, ID 10603, DOI: 10.3390/su122410603
- [30] *Hernandez J.A., Al-Qadi I.L.*: Semicoupled Modeling of Interaction between Deformable Tires and Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, **143**, 2017, 1-9, DOI: 10.1061/JTEPBS.0000007
- [31] *Guo M., Zhou X.*: Tire-Pavement Contact Stress Characteristics and Critical Slip Ratio at Multiple Working Conditions. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2019**, ID 5178516, DOI: 10.1155/2019/5178516