



MARIAN TRACZ¹⁾
MARIUSZ KIEĆ²⁾

DEVELOPMENT AND UPGRADING OF TWO-LANE SINGLE ROAD NETWORK IN POLAND

ROZWÓJ I PRZEBUDOWA DRÓG DWUPASOWYCH DWUKIERUNKOWYCH W POLSCE

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono problemy rozwoju i przebudowy sieci dwupasowych dróg dwukierunkowych, które przez wiele lat tworzyły podstawową sieć drogową w Polsce. Jako że budowa autostrad i niektórych dróg ekspresowych odbywa się według znanych zasad, autorzy skupili się na opisie problemów przebudowy sieci dwupasowych dróg dwukierunkowych oraz ich funkcjonowania, wraz z ich zmieniającą się rolą. W artykule przedstawiono analizę zmian funkcjonowania głównych dróg, związanych m.in. z budową obwodnic oraz ich działaniem, z uwzględnieniem tych o przekroju 2+1, przebudowę popularnych przekrojów 1×2 z utwardzonymi poboczami na przekroje 1×2 ze środkowymi pasami wielofunkcyjnymi dla dróg w terenach zabudowanych oraz na przekroje z dodatkowym pasem do wyprzedzania (2+1). W artykule przedstawiono wybrane analizy bezpieczeństwa ruchu i funkcjonowania wyżej wymienionych odcinków. W końcowej części artykułu przedstawiono podsumowanie i rekomendacje dla rozwoju oraz przebudowy sieci dwupasowych dróg dwukierunkowych w Polsce.

SŁOWA KLUCZOWE: bezpieczeństwo ruchu, droga dwupasowa dwukierunkowa, obwodnica, pas wielofunkcyjny, przekrój 2+1, ruch drogowy, SPF.

ABSTRACT. The paper presents the problems related to the development and upgrading of two-lane single road network which for many years constituted the basic road network in Poland. With well-known principles of the development of motorways and also some expressways this paper focuses on the problems of retrofitting and operation of two-lane single roads taking into account their changing role. It analyses the changes in the functioning of the main roads resulting, inter alia, from construction and operation of bypasses, taking into account 2+1 roads and retrofitting popular 1×2 roads, including paved shoulders with a multifunctional median lane separating the two lanes in built-up areas and a passing relief lane. The paper includes some road safety and operational analyses of the above-mentioned sections. The final part comprises summary and recommendations for development and upgrading of two-lane single road network in Poland.

KEYWORDS: 2+1 cross-section, bypass, road safety, multifunctional median lane, traffic, two-lane single road, Safety Performance Function (SPF).

¹⁾ Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska, 31-155 Kraków; mtracz@pk.edu.pl

²⁾ Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska, 31-155 Kraków; mkieć@pk.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Nagły wzrost motoryzacji w Polsce po roku 1990, przy jednoczesnym braku autostrad i dróg ekspresowych, spowodował intensywny wzrost natężenia ruchu na dwupasowych dwukierunkowych (1×2) drogach krajowych zwanych dalej drogami dwupasowymi, które stanowiły podstawową sieć drogową. Znaczna część tych dróg miała utwardzone pobocza wykorzystywane przez pieszych, a także przez wolno jadące pojazdy, dzięki czemu zwiększały się możliwości wyprzedzania pojazdów wolnych przez szybsze. Budowa autostrad i dróg ekspresowych nie zatrzymała ogólnego wzrostu ruchu na drogach dwupasowych, jednak stopniowo zmieniała się charakterystyka tego ruchu, co jest częściowo spowodowane również przez wdrożenie opłat za korzystanie z niektórych dróg.

W celu zwiększenia płynności i bezpieczeństwa ruchu na dwupasowych drogach, w opisanej sytuacji podjęty został program rekonstrukcji dróg krajowych 1×2. Program przebudowy obejmuje:

- a) budowę wielu obwodnic drogowych miast o dwóch typach przekrojów, tj. przekroju 1×2 pasy ruchu oraz przekroju 2+1, tj. dwupasowych dróg z dodatkowym pasem do wyprzedzania, stosowanym przemiennie w jednym i drugim kierunku ruchu,
- b) przebudowę istniejących przekrojów dwupasowych dróg (1×2) do przekrojów 2+1 na drogach zamiejskich w celu ułatwienia wyprzedzania pojazdów wolno bieżnych na tych odcinkach dróg, na których potrzeba wyprzedzania była duża i zauważalna,
- c) przebudowę przekrojów 1×2 z utwardzonymi poboczami przechodzącymi przez małe miejscowości na przekroje z dodatkowym środkowym pasem wielofunkcyjnym – przy wykorzystaniu szerokości utwardzonych poboczy, które są używane przez pojazdy skręcające z drogi 1×2 w lewo lub wjeżdżające na tę drogę,
- d) przebudowę znacznej liczby skrzyżowań, w tym wielu na ronda nowego typu (ronda turbinowe, ronda o wyspie środkowej w kształcie innym niż koło) w celu osiągnięcia ich lepszej sprawności ruchowej i większego bezpieczeństwa ruchu,
- e) zapewnienie na drogach wystarczających szerokości przekrojów umożliwiających wydzielenie chodników i ścieżek rowerowych, które zapewnią segregację pieszych i rowerzystów od ruchu kołowego, jak również zastosowanie elementów „dróg wybaczących błędy” (łagodniejsze skarpy, szersze pobocza, usunięcie przeszkód bocznych),

1. INTRODUCTION

After 1990 Poland experienced a rapid growth in the number of motor vehicles and with hardly any motorways or expressways in place, so that traffic had to use the existing two-lane single main roads (1×2), further called two-lane roads, which at that time constituted the primary road network in Poland. Most of these roads had paved shoulders used by pedestrian and also by vehicles moving at lower speeds to facilitate passing by faster road users. The motorway and expressway construction scheme did not prevent the further overall increase in the traffic volume on the single road network, changing only gradually the composition of traffic, partly because of the introduction of tolling on some roads in Poland.

Therefore, an upgrading scheme was adopted to improve the traffic performance on the existing single road network (1×2). The upgrading scheme comprised:

- a) construction of numerous bypasses of towns and cities with two cross-section types: 1×2 roads and 2+1, i.e. two lanes with additional passing relief lane alternating in each direction (alternating passing lane),
- b) retrofitting of the existing two-lane roads (1×2) with the passing relief lane (2+1) on rural sections in order to facilitate passing of slow moving vehicles where passing demand was most needed and noticeable,
- c) retrofitting of 1×2 roads including paved shoulders on sections running through smaller towns and villages with additional multifunctional median lane, using for this purpose the widths of paved shoulders used by vehicles entering or turning left off the road 1×2,
- d) reconstruction of a large number of junctions, including many conversions to new roundabouts (turbo-roundabouts and roundabouts with non-circular centre islands) in order to improve the operation and safety of traffic,
- e) ensuring sufficient cross-section to accommodate footways and cycle paths separated from the vehicle roadside design (flattening side slopes, widening shoulders, removing roadside hazards),
- f) providing footpaths within the road prism or beyond the roadside ditches upstream of towns and cities.

This paper deals with the three first of the above-mentioned upgrading methods and presents some studies of the operating of retrofitted roads and road users' behaviour. The final part includes conclusions and recommendations concerning the described design arrangements.

- f) budowa chodników w obrębie korony drogi lub poza rowami drogowymi na odcinkach wlotowych dróg do miast.

W artykule zostały opisane przez autorów pierwsze trzy sposoby przebudowy dwupasowych dróg wraz z niektórymi wynikami badań dotyczącymi funkcjonowania przebudowanych dróg i zachowań uczestników ruchu drogowego. W podsumowaniu przedstawiono wnioski oraz zalecenia dotyczące rozwiązań opisanych w niniejszym artykule.

2. POZYTYWNE I NEGATYWNE DOŚWIADCZENIA W PROJEKTOWANIU OBWODNIC

2.1. ODCINEK DROGI POPRZEDZAJĄCY OBWODNICĘ

Najczęstsze problemy ruchowe na drogach krajowych o przekrojach 1×2 dotyczą licznych odcinków dróg przebiegających przez miasta, miejscowości i inne zurbanizowane tereny. Na tych odcinkach występują nie tylko ograniczenia prędkości, ale również wiele skrzyżowań, duża liczba punktów dostępności oraz przejść dla pieszych, które zmniejszają przepustowość, powodują zatrzymania i w konsekwencji straty czasu przejazdu pojazdów. Takie przebiegi tras dróg zwiększają również ryzyko wystąpienia wypadku. W celu poprawy bezpieczeństwa i warunków ruchu w ostatnim okresie zbudowano wiele obwodnic drogowych z różnymi przekrojami – 1×2, 2+1, 2×2 pasy. Zaplanowano także budowę wielu nowych obwodnic. Przebudowa istniejących dróg oraz budowa obwodnic miast ma w Polsce bardzo pozytywny wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego i funkcjonowanie sieci drogowej. Równocześnie analizy bezpieczeństwa ruchu, jego audyt oraz prace badawcze umożliwiły eliminację usterek oraz błędów w praktyce projektowania nowych obwodnic.

Obecnie zakres ich projektowania obejmuje odcinek drogi od skrzyżowania/węzła jako początku odcinka obwodnicy. W tym miejscu ruch w kierunku „starego” przejścia przez daną miejscowość zostaje oddzielony. Odcinki poprzedzające początek obwodnicy, które zazwyczaj charakteryzują się brakiem odpowiedniej kontroli dostępności, nie są przebudowywane. Jednakże w otoczeniu początku i końca obwodnicy obserwuje się często duże inwestycje o charakterze komercyjnym. Pojawiają się również tendencje do inwestowania w obiekty usługowe (takie jak stacje paliw, hotele, sklepy, etc.) przy „starym wejściu drogi” do miasta. Z tego też powodu wybór rodzaju początkowego skrzyżowania

2. GOOD AND BAD EXPERIENCES IN DESIGNING BYPASSES

2.1. ROAD SECTION UPSTREAM OF BYPASS

On 1×2 national roads, most of the traffic-related problems concern numerous sections running through towns, villages and other urban areas. The constraints include, besides the posted speed limits, a large number of junctions, access points and pedestrian crossings which reduce the capacity, cause disruptions to the traffic and result in a delay. Moreover, such routing increases the risk of accidents. Therefore, in order to improve road safety and traffic performance the design of bypass roads has been varied between 1×2, 2+1 and 2×2. Moreover, a number of new bypasses have been included in the plans. Retrofitting of the existing roads and construction of new bypasses of towns and cities has a very good effect on the safety of traffic and the performance of the road network in Poland. Simultaneously a number of traffic safety analyses, road safety audits and research studies were carried out to eliminate flaws and errors in designing new bypasses.

Currently, planning of new bypasses starts from the junction/interchange which is considered the point of origin of the designed bypass. This is the point of traffic diversion from the former route through the city, town or village. Thus the sections upstream of the planned bypasses, most often not provided with appropriate access control, are excluded from the scope. However, the areas at the bypass terminal points are often the place of large commercial projects. Furthermore, retail services are often located at the old entrance to the town, including filling stations, hotels, shops. For this reason it is so important to design the appropriate bypass entrance junctions, in particular to avoid long queues of vehicles at the entrance/exit from the bypassed town or city.

According to the principles of access control on secondary highways (class GP according to the Polish classification system) new commercial buildings or retail parks are generally linked with the “old” road leading to the junction, thus generating high traffic level at the bypass entry junctions. Taking into account the different features of the road sections leading to bypass and the bypass itself it is very important to provide appropriately designed transition zones, including sections of different traffic characteristics where transit and local traffic merge. In such situations there are two arrangements for connecting the bypass

okazuje się być bardzo ważną decyzją, szczególnie w celu uniknięcia długich kolejek pojazdów przy włączeniu/wyłączeniu drogi z miejscowości.

Zgodnie z zasadą kontroli dostępności do dróg klasy technicznej GP, nowe komercyjne budynki lub kompleksy handlowe są na ogół podłączone do „starej” drogi prowadzącej do skrzyżowania, co generuje znaczny ruch na skrzyżowaniach zlokalizowanych na początku danej obwodnicy. Ze względu na istotne różnice pomiędzy odcinkami poprzedzającymi obwodnicę, jak i samą obwodnicą, ważne jest, aby racjonalnie zaprojektować między nimi strefy przejściowe, w których występują odcinki o różnych charakterystykach ruchu tam, gdzie nakładają się: ruch tranzytowy i ruch lokalny. W takich przypadkach są dwa rozwiązania możliwe do zastosowania w celu połączenia obwodnicy z takim odcinkiem drogi. Pierwsze z nich zakłada płynne przejście obwodnicy w normalny zamiejski odcinek drogi z ograniczoną prędkością bez stosowania specjalnych urządzeń do wyprzedzania. Drugi wariant polega na ułatwieniu manewrów wyprzedzania na obwodnicy – zwykle przez zastosowanie przekroju 2+1.

W strefach przejściowych są stosowane następujące środki: strefowanie prędkości oraz kontrola dostępności, zmiany typu przekroju (początki chodników i dróg rowerowych lub wspólne drogi), a niekiedy drogi serwisowe. Takie rozwiązania powinny zapewnić jednorodność geometryczną drogi dostosowaną do prędkości miarodajnej. Innym kluczowym zagadnieniem w projektowaniu stref przejściowych jest określenie głównego zadania obwodnicy, tj. czy ma to być odcinek drogi służący do wyprzedzania (w celu zmniejszenia kolumn pojazdów tworzących się wcześniej), czy odcinek drogowy zapewniający skrócenie czasu podróży (płynny ruch przy umiarkowanej prędkości). W związku z tym zaleca się, aby dla obszaru otoczenia odcinka poprzedzającego obwodnicę tworzony był plan zagospodarowania przestrzennego, który mogłyby ustalić, jak rozwiązać wyżej wymienione problemy w sposób systemowy, biorąc pod uwagę kryteria dostępności obowiązujące na obwodnicy.

2.2. TRASA W PLANIE SYTUACYJNYM I PRZEKRÓJ PODŁUŻNY

Projekty trasy i niwelety są zazwyczaj kompromisem między zajętością terenu oraz uwarunkowaniami: środowiskowymi (głównie hałasu) [1], odwodnienia, rodzaju podłoża, jak również kryteriów ekonomicznych. W przypadku projektowania obwodnicy z odcinkami o przekroju 2+1 należy ten ostatni czynnik dodatkowo uwzględnić przy ustalaniu długości obwodnicy, biorąc pod uwagę liczbę i długość odcinków o dwóch różnych przekrojach poprzecznych (2+1;

with the relevant road section. The first one assumes smooth transition of the bypass to a normal highway section with imposed speed limit and without special passing facilities. The second arrangement involves introduction of passing facilities on the bypass section – in most cases by using the 2+1 design.

The following measures are used in the transition zones: speed zoning and access control, changes in the road cross-sections (commencing of footways and cycle paths or mixed-use roads) and sometimes also service roads. These arrangements should ensure geometric uniformity of the road appropriate to the operating speed. Another key aspect of designing the transition zone is identifying the main function of the bypass, be it for passing (in order to relieve the upstream congestion) or to reduce the time of travel (fluent performance of traffic at moderate speed). Hence it is advisable to develop a local land-use plan for the section upstream of the bypass to provide an area-wide solution to the above-mentioned problems, taking into consideration the bypass access control criteria.

2.2. HORIZONTAL AND VERTICAL ALIGNMENT

The designed horizontal and vertical alignment is in the most cases a compromise between availability of land and different considerations: environmental (mainly noise-related) [1], drainage design, type of subgrade and economic criteria. In the case of bypasses with 2+1 design the last of the above-mentioned considerations should be taken into account when determining the bypass length, considering the numbers and the total lengths of sections with the two configurations (2+1 and 1×2). The practice to design new bypasses on high embankments should be discouraged as it results in:

- higher construction cost (due to additional cost of embankments),
- restrictions imposed on geometric parameters of the road cross-section (keeping the shoulder width to the allowable minimum and maximum allowable inclination of side slopes),
- additional cost of noise protection measures.

2.3. BYPASS ENTRANCE JUNCTIONS AND INTERCHANGES

The traffic in the bypass junctions differs from the traffic in regular road junctions. Therefore, when designing bypass junctions it is necessary to consider the structure and traffic distribution between the approach entries. For many

1×2). Niekorzystnym, obserwowanym rozwiązaniem w przypadku nowych obwodnic jest projektowanie ich na wysokich nasypach, co skutkuje m.in.:

- wyższymi kosztami realizacji inwestycji (koszty realizacji nasypów),
- ograniczeniem, do wartości granicznych, parametrów geometrycznych przekroju poprzecznego (minimalne szerokości poboczy, maksymalne pochylenia skarp nasypów),
- koniecznością zwiększenia nakładów na zabezpieczenia akustyczne.

2.3. SKRZYŻOWANIA I WĘZŁY ROZPOCZYNAJĄCE OBWODNICE

Ruch na skrzyżowaniach obwodnic jest inny niż ten na skrzyżowaniach znajdujących się na zwykłych odcinkach drogowych. Podczas projektowania skrzyżowań na obwodnicach należy przeanalizować różnice w strukturze i natężeniach ruchu na poszczególnych wlotach. Przez wiele lat skrzyżowania rozpoczynające obwodnice były projektowane jako skanalizowane z trzema wlotami i z dodatkowymi pasami do skrętu w lewo i/lub w prawo – prowadzącymi do miasta. Praktyka projektowania na przestrzeni ostatnich 10 lat przyniosła, obok wciąż stosowanych trzywlotowych skrzyżowań skanalizowanych z sygnalizacją i bez sygnalizacji, także nowe rozwiązania skrzyżowań na początku/końcu obwodnic, w tym:

- średniej wielkości ronda o średnicy 45-60 m oraz ronda turbinowe,
- węzły typu karo z dwoma małymi rondami lub ze skrzyżowaniami skanalizowanymi,
- węzły typu trąbka.

Wymienione skrzyżowania i węzły wpływają na warunki ruchu wzdłuż obwodnicy oraz na prędkość potoku ruchu. Pod względem funkcjonowania można je podzielić na trzy grupy:

- skrzyżowania, które mogą powodować zakłócenia w ruchu po obwodnicy – czyli ronda i różne rodzaje skrzyżowań z sygnalizacją świetlną – z powodu tworzących się na wlotach długich kolejek pojazdów.

Charakterystyczną właściwością rond jest fakt, że pojazd zbliżający się do wlotu ronda musi zmniejszyć prędkość tak, aby ustąpić pierwszeństwa pojazdom będącym na jezdni ronda. Pojazdy na wlocie ronda, podczas poruszania się w kolejce, muszą zatrzymać się kilka razy - w zależności od rozkładu ruchu na wlotach. W przypadku skrzyżowań z sygnalizacją świetlną

years bypass entrance facilities were three-way junctions with channelizing islands and left- and/or right-turn lanes leading to the bypassed locality. In the last ten years new arrangements were introduced beside the three-way channelized signalized and unsignalized intersections for the bypass entrance/exit junctions including:

- medium-size roundabouts of 45-60 m in diameter and turbo-roundabouts,
- diamond interchanges with two small roundabouts or channelized intersections,
- trumpet interchanges.

The above-mentioned intersections and interchanges affect the speed and performance of traffic on the bypass. From the functional perspective they can be classified as:

- intersections that can disturb traffic on the bypass - that is roundabouts and various signalized intersections – due to long queues forming at the intersections.

As a signature feature of all roundabouts the approaching vehicles must slow down to yield to the traffic in the circulatory roadway. Vehicles in the queue upstream of the roundabout must stop a few times – depending on the traffic distribution between the approaches. In the case of signalized intersections the traffic on the major road is stopped when there is a need for the green signal to be displayed on the minor entry. On the major road the speed of travel is high with the flow interrupted from time to time for short periods of times;

- junctions ensuring good traffic performance along the bypass – channelized intersection with the right of way granted to the traffic stream along the bypass;
- diamond and trumpet interchanges which, while being more expensive, ensure very good traffic performance and enable expanding the 2+1 road system (if needed).

2.4. ROUNDABOUTS ON BYPASSES

Medium-sized roundabouts are often designed in Poland as the bypass entrance facilities or parts of diamond interchanges (most often with small roundabout junctions). Regular, medium-sized roundabouts (either with or without lane markings) of 50 m or more in diameter are designed as separate traffic facilities. Turbo-roundabouts have also been designed in Poland for a few years now. They can improve traffic performance in one direction (bypass extension). Note that roundabouts should be designed also for all kinds of long vehicles. This makes small

ruch na głównej drodze jest zatrzymywany w sytuacji, gdy pojawia się zapotrzebowanie na otrzymanie sygnału zielonego przez użytkowników na wlocie podporządkowanym. Na głównym kierunku utrzymywana jest wysoka prędkość, która jest zakłócana przez chwilowe zatrzymania pojazdów;

- skrzyżowania zapewniające dobre warunki ruchu wzdłuż obwodnicy – skanalizowane skrzyżowania z pierwszeństwem dla ruchu wzdłuż obwodnicy;
- węzły typu karo i trąbka, droższe oraz zapewniające bardzo dobre warunki ruchu i możliwość wydłużenia systemu odcinków dróg 2+1 (w razie potrzeby).

2.4. RONDA NA OBWODNICACH

W Polsce ronda średniej wielkości są obecnie często projektowane jako skrzyżowania rozpoczynające obwodnice lub jako elementy węzła typu karo (zazwyczaj ze skrzyżowaniami typu małe rondo). Zwykle rondo o średniej wielkości działają niezależnie (z wyznaczonymi pasami na jezdni lub bez oznakowania poziomego) o średnicy 50 m lub większej. Od kilku lat stosowane są także rondo turbinowe. Mogą one zapewnić lepsze warunki jazdy w jednym kierunku (przedłużenie obwodnicy). Należy zwrócić uwagę, że rondo powinny także gwarantować przejezdność dla różnego rodzaju długich pojazdów. Z tego powodu rondo małych rozmiarów nie są praktyczne. Podczas projektowania rond należy pamiętać o możliwej obecności pieszych lub rowerzystów. Wskazane jest, aby projektować rondo tylko przy ograniczonym natężeniu ruchu pieszych.

Chociaż korzystanie z rond w wielu miejscach przyniosło bardzo pozytywne rezultaty, takie jak zmniejszenie liczby wypadków drogowych oraz poprawę przepustowości i warunków ruchu, ich zastosowanie na obwodnicach dróg klasy GP powinno być dokładnie przeanalizowane. Koniecznym jest, aby dokładnie rozpatrzyć wielkość i strukturę natężenia ruchu, przepustowość rondo, a także długości kolejek na wlotach. Zbyt długie kolejki mogą negatywnie wpłynąć na funkcjonowanie odcinka obwodnicy, w szczególności o przekroju 2+1 przed rondem.

2.5. WĘZŁY NA OBWODNICY

Pomimo wyższych kosztów budowy węzłów, w porównaniu ze skrzyżowaniami, wybór węzła na początku obwodnicy może być korzystny. W porównaniu do skrzyżowania węzeł umożliwia zwiększenie długości systemu 2+1 lub odcinków dróg z przekrojami 2+1 (jeśli takie są zaprojektowane) i zapewnia lepszy przebieg ruchu. Przy wyborze i projektowaniu

roundabouts impractical. Consideration should also be given to possible presence of pedestrians and cyclists. However, roundabouts should, as a recommendation, be designed where only small volume of pedestrian traffic is expected.

With many benefits of roundabouts noted in many places, including reduced accident rate, higher capacity and traffic performance, their use on the secondary highways requires careful consideration. The primary factors to be considered are the traffic volume and composition, roundabout capacity and lengths of upstream queues. Too long queues can affect the performance of the bypass section which effect can be particularly noticeable in the 2+1 design upstream of the roundabout.

2.5. INTERCHANGES ON THE BYPASS

Despite a higher cost of construction as compared to at-grade intersections, an interchange can still be an option of choice as the bypass entrance facility. Interchanges enable increasing the length of 2+1 road system or roads including 2+1 sections (if designed) and improve the performance of traffic. The following arrangements can be considered for interchanges providing the entrance to the bypass section:

- trumpet design,
- diamond interchange including roundabouts – one medium-sized or two small roundabouts or other circular intersections. Turbo “eight” or oval shape roundabouts are also worthwhile consideration.

The choice and design of bypass entrance intersection/interchange should consider:

- capacity analyses, taking into account the predicted traffic volume and traffic variations (including changes in the directional distribution),
- increasing the capacity reserve (above the usually required one) since low volume-to-capacity ratio and shorter queues have a most relieving effect on the traffic congestion on the bypass sections encouraging, as a consequence, the drivers to take the same route the next time they arrive,
- the expected lengths of queues, especially in the case of 2+1 bypass configuration – this is particularly important for the traffic leaving the bypass encountering the queue encroaching on the passing lane,
- the presence and volume of pedestrian and cycle traffic.

węzłów początkowych należy pamiętać o możliwości korzystania z następujących typów węzłów:

- trąbka,
- karo z rondami – z jednym średnim rondem albo dwoma małymi rondami, lub innego rodzaju skrzyżowaniami z ruchem okrężnym. Wybór ronda turbinowego typu „8” albo owalnego może być również bardzo korzystny.

Przy wyborze i projektowaniu skrzyżowań i węzłów na początkach obwodnicy powinno się rozważyć następujące kwestie:

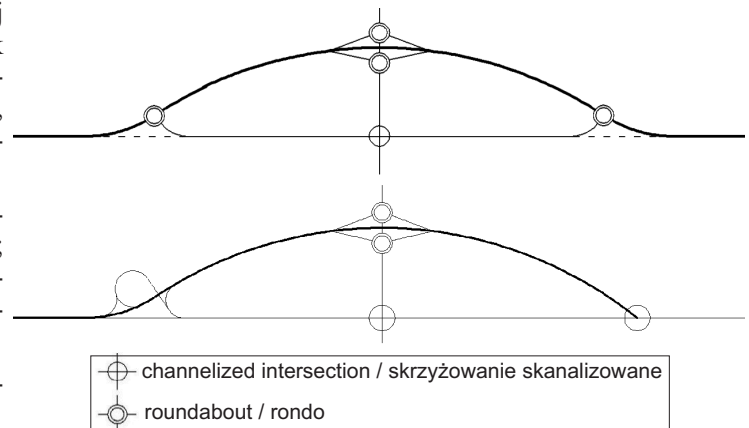
- wyniki analizy przepustowości, z uwzględnieniem prognozowanego natężenia i wahań ruchu (w tym zmian w strukturze kierunkowej),
- zwiększenie rezerwy przepustowości (tj. większej niż zazwyczaj wymagane), ponieważ niski wskaźnik obciążenia i krótsze kolejki maksymalne przyczyniają się do zmniejszenia zatorów na obwodnicach, a w konsekwencji mogą zachęcić kierujących do wybrania przy następnym przejeździe tej samej trasy,
- przewidywane długości kolejek, szczególnie w przypadku projektowania przekrojów 2+1 na obwodnicy; dotyczy to głównie pojazdów opuszczających obwodnicę, gdy kolejka może zachodzić na pas do wyprzedzania,
- obecność ruchu pieszego i rowerzystów oraz ich natężenie.

Oprócz wyżej wymienionych kryteriów, bardzo ważna przy wyborze typu początkowych skrzyżowań lub węzłów jest dominująca funkcja obwodnicy. Jeżeli ważne jest ułatwienie wyprzedzania na obwodnicy wraz z jednoczesnym zastosowaniem systemu 2+1, to w takim przypadku korzystne jest zastosowanie węzłów. Węzły karo są projektowane z różnymi typami skrzyżowań, np. z kilkoma typami skrzyżowań skanalizowanych, bez lub z sygnalizacją świetlną oraz z kilkoma typami rond. Rys. 1 przedstawia schematy typowych rozwiązań. Jeśli cel stanowi zapewnienie dobrych warunków ruchu z prędkością mniejszą niż 90 km/h, wskazana jest budowa skrzyżowania na początkach obwodnicy. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na wybór typu skrzyżowań lub węzłów jest dostępny obszar.

2.6. BEZPIECZEŃSTWO RUCHU

W celu oceny wpływu obwodnic na poziom bezpieczeństwa ruchu zbudowano modele wypadkowe w postaci *Safety Performance Function* (SPF) dla odcinków obwodnic i dróg dwupasowych. Analiza bezpieczeństwa ruchu została

Besides the above-mentioned criteria in choosing between intersection and interchange it is important to consider the primary function of the bypass. Interchange would be a preferred choice if passing is encouraged and 2+1 system is planned on the bypass. Diamond interchanges can include intersections of various design: channelized (different types), signalized or unsignalized and with different types of roundabouts. Typical arrangements are presented schematically in Fig. 1. However, if the main objective is to ensure good conditions of traffic travelling at a speed of less than 90 km/h an at-grade intersection, it would be a better choice as the bypass entrance arrangement. As an additional factor the availability of land should be considered when choosing between the interchange and at-grade intersection.



Rys. 1. Przykłady schematów obwodnicy ze skrzyżowaniami i węzłami

Fig. 1. Examples of bypasses with intersections and interchanges

2.6. ROAD SAFETY

The bypass safety performance was assessed by using the *Safety Performance Functions* (SPF) defined for the bypasses and two-lane roads. Generalised linear regression models were used to define the safety performance functions. This method follows the approach described in the Highway Safety Manual [2]. Negative binomial distribution of the random variable of the accident count was used in the GLM statistical modelling. The models developed in this way enable predicting the numbers of accidents on the bypasses built after 2000 and on the two-lane roads. The chosen variables are described in Table 1.

przeprowadzona na podstawie funkcji SPF zbudowanych z wykorzystaniem uogólnionych modeli liniowych (GLM). Tę metodę użyto zgodnie z podejściem opisanym w HSM [2]. W modelowaniu statystycznym GLM zastosowano ujemny dwumianowy rozkład zmiennej losowej liczby wypadków. Opracowane modele umożliwiają prognozowanie liczby wypadków na odcinkach obwodnic budowanych po 2000 roku oraz dla dróg dwupasowych. Wybrane zmienne zostały opisane w Tabl. 1.

Table 1. Variables used for SPF modelling
Tablica 1. Zestawienie zmiennych wykorzystanych do budowy SPF

Section - number of sections Odcinek - liczba odcinków	Section length L [km] Długość odcinka				Number of recorded accidents [-] Liczba obserwowanych wypadków				Average annual daily traffic $AADT$ [Veh./day] Średnio dobowe natężenie ruchu SDR [Poj./24h]			Driveway density DD [No./km] Gęstość zjazdów DD [Zj./km]		
	min	mean śr.	max	sum suma	min	mean śr.	max	sum suma	min	mean śr.	sum suma	min	mean śr.	sum suma
Upstream of the bypass, paved shoulder - 146 (SPF_{TL_ps}) Poprzedzający obwodnicę z poboczem utwardzonym - 146 (SPF_{TL_ps})	0.1	1.1	5.8	161	0	0.32	5	334	2 020	11 972	24 646	0	0.66	6.66
Upstream of the bypass, ground shoulder - 153 (SPF_{TL_gs}) Poprzedzający obwodnicę z poboczem gruntowym - 153 (SPF_{TL_gs})	0.1	1.3	5.0	200	0	0.29	4	312	2 033	7 494	18 466	0	0.75	12.5
Composing the bypass - 124 (SPF_{byp_ps}) Obwodnicy - 124 (SPF_{byp_ps})	0.1	1.2	6.6	152	0	0.26	5	21	2 575	9 698	19 104	0	0.18	2.35

Okres zbierania danych dla potrzeb analiz obejmował lata 2006-2012. Oprócz typowych zmiennych w SPF, tj. natężenia ruchu SDR i długości odcinka L , uwzględniono również zmienną niezależną, charakteryzującą dostępność do drogi, tj. gęstość zjazdów DD . Zmienna ta została wprowadzona do SPF tylko w przypadku jej statystycznej istotności na poziomie p -value $< 0,1$. Poniżej przedstawiono zbudowane modele SPF, pozwalające oszacować predykwowaną liczbę wypadków, do oceny stanu bezpieczeństwa ruchu na obwodnicach. Oznaczenia we wzorach zastosowano według Tabl. 1:

$$SPF_{TL_ps} = SDR^{0,587} \cdot L^{0,849} \cdot e^{-6,638} \quad [l. \text{wyp.}], \quad (1)$$

$$SPF_{TL_gs} = SDR^{0,521} \cdot L^{0,914} \cdot e^{-6,168+0,12 \cdot DD} \quad [l. \text{wyp.}], \quad (2)$$

$$SPF_{byp_gs} = SDR^{0,422} \cdot L^{0,95} \cdot e^{-5,514+0,009 \cdot DD} \quad [l. \text{wyp.}], \quad (3)$$

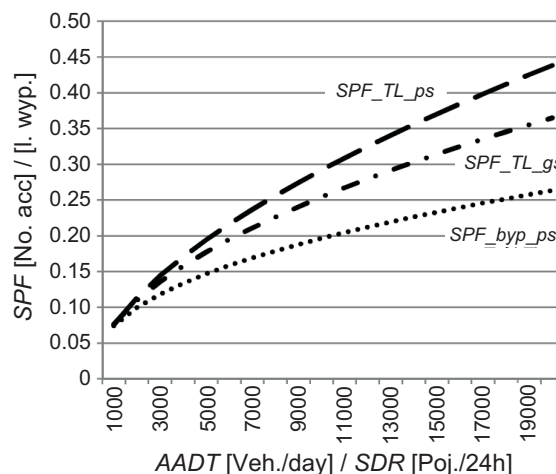
The input data are from the 2006-2012 time period. Driveway density DD , an independent variable describing the road access control, was introduced beside the typical SPF variables, namely $AADT$ and section length. However, it was applied only if its significance was at the level of p -value < 0.1 . Below are the Safety Performance Functions which were used to predict the number of accidents for the purpose of bypass safety performance assessment. The designations are as per Table 1:

$$SPF_{TL_ps} = SDR^{0,587} \cdot L^{0,849} \cdot e^{-6,638} \quad [No. \text{acc.}], \quad (1)$$

$$SPF_{TL_gs} = SDR^{0,521} \cdot L^{0,914} \cdot e^{-6,168+0,12 \cdot DD} \quad [No. \text{acc.}], \quad (2)$$

$$SPF_{byp_gs} = SDR^{0,422} \cdot L^{0,95} \cdot e^{-5,514+0,009 \cdot DD} \quad [No. \text{acc.}], \quad (3)$$

The curves of the SPF accident rates for the situation with no driveways are presented in Fig. 2.



Rys. 2. SPF dla obwodnic i dwupasowych dróg dwukierunkowych o różnych rodzajach poboczy

Fig. 2. SPF for bypasses and two-way roads with different shoulder types

Wykresy zmienności modeli SPF dla odcinków o długości 1 km, przy braku zjazdów, zostały przedstawione na Rys. 2.

Analiza bezpieczeństwa ruchu prowadzi do wniosku, że rejestrowana liczba wypadków na badanych obwodnicach, które mają wąskie utwardzone pobocza (SPF_{byp_ps}) i są zbudowane po 2000 roku, jest niższa w porównaniu z przewidywaną liczbą wypadków dla zamiejskich odcinków dróg krajowych o przekrojach 1×2 z szerokimi utwardzonymi poboczami (SPF_{TL_ps}) oraz dla przekrojów 1×2 z poboczami gruntowymi (SPF_{TL_gs}) (wzory od 1 do 3). Analizy wskazują na pozytywny wpływ budowy obwodnic na bezpieczeństwo ruchu drogowego szacowane w sposób regresyjny na podstawie SPF. Wpływ ten może wynikać z wyższego standardu technicznego nowo budowanych obwodnic.

3. ANALIZA PRZEBUDOWY PRZEKROJU 1×2 NA PRZEKRÓJ 2+1

Innym rozwiązaniem dla poprawy bezpieczeństwa ruchu i jego płynności jest, w przypadku istniejących dróg dwupasowych, ich przebudowa do przekroju 2+1. Poniżej przedstawiono analizę funkcjonowania i ocenę sprawności przebudowanych odcinków dróg o przekroju 2+1. Lokalne przebudowy odcinków dróg dwupasowych z szerokimi utwardzonymi poboczami na drogi o przekrojach 2+1 były realizowane w Polsce od 2006 roku. Dodawanie nowych pasów ruchu, szczególnie z powodu ograniczeń budżetowych, jest ważną alternatywą dla większej rozbudowy drogi.

Realizacja odcinków 2+1 przyczynia się do: poprawy warunków ruchu, zwiększenia prędkości podróży, zmniejszenia kolumn pojazdów, a także zwiększenia możliwości wyprzedzania wolno poruszających się pojazdów przez samochody osobowe. Odcinki takie wpływają również pozytywnie na zmniejszenie frustracji kierujących z powodu długich okresów jazdy w kolumnie. Ze względu na przebudowę istniejących dróg, w większości przypadków warunki te nie mogą być ściśle spełnione poprzez zastosowanie typowego przekroju 2+1, który charakteryzuje się naprzemianległymi odcinkami drogi z dodatkowym pasem do wyprzedzania o minimalnej długości około 1 km. Brak kontroli dostępności powoduje konieczność stosowania dodatkowych krótkich pasów do wyprzedzania na odcinkach przebudowanych dróg. Zazwyczaj są one krótsze niż zalecane w [3].

Na podstawie zgromadzonych danych z drogi krajowej nr 4 zostały obliczone następujące zmienne: prędkości chwilowe, prędkość podróży, średni udział procentowy pojazdów poruszających się w kolumnie, długości kolumn, udział procentowy pojazdów ciężkich. W badaniach założono, że kolumny

According to the traffic safety analysis the crash count on the analysed bypasses with narrow paved shoulders (SPF_{byp_ps}) built after 2000 is lower than the predicted number of accidents on 1×2 highways with wide paved shoulders (SPF_{TL_ps}) and on 1×2 roads with ground shoulders (SPF_{TL_gs}) (equations 1-3). The analyses performed with SPF regression models have demonstrated that the analysed bypasses exert a good effect on the safety of traffic. This influence can be possibly attributed to higher specifications of new bypasses.

3. ANALYSIS OF CONVERSION FROM 1×2 TO 2+1 CROSS-SECTION

Another option to improve the safety and traffic performance on the existing two-lane roads is their conversion to 2+1 design. Below the analysis of the performance and efficiency of road sections upgraded to 2+1 design can be found. Such upgrading has been done in Poland since 2006 for two-lane roads including wide paved shoulders. Adding new lanes is an important alternative to larger scale upgrading projects, primarily for economic reasons.

The benefits of upgrading the existing road sections to 2+1 design include improved traffic performance, higher speed of travel, smaller platoon sizes and easier passing of slow vehicles by cars. Moreover, such sections can alleviate frustration caused by driving for longer periods of time travelled in platoons. Since the scheme concerned the existing roads in most cases, it was impracticable to implement typical 2+1 road design with minimum 1 km long passing relief lane. With no access control measures it was necessary to provide additional, short passing relief lanes on the retrofitted sections. In most cases they are shorter than the length recommended in [3].

The following variables were calculated on the basis of the data collected from the national road No. 4: instantaneous speed, speed of travel, mean percentage of vehicles travelling in a platoon, platoon size, percentage of heavy vehicles. A platoon was assumed to be composed of vehicles moving with headways of less than 3 seconds [4, 5]. The purpose of the study was to quantify the following variables influencing the performance of 2+1 sections, as reported in Table 2, i.e.:

- change of the percentage of vehicles moving in platoons,
- speed of travel per lane,
- passing rates (percentage of passing vehicles),
- changes in the platoon sizes (average number of vehicles in a platoon).

zbudowane są z pojazdów poruszających się w odstępach mniejszych niż 3 sekundy [4, 5]. Cele badania obejmowały kwantyfikację następujących zmiennych mających wpływ na funkcjonowanie odcinków 2+1, które przedstawiono w Tabl. 2, tj.:

- zmiany procentowej udziału pojazdów poruszających się w kolumnie,
- prędkości podróży na pasach,
- udziału procentowego pojazdów wyprzedzających,
- zmiany w długości kolumn pojazdów (średnia liczba pojazdów w kolumnie).

Due to short lengths of sections with the additional lane particular attention was paid to discharging of platoons. The mean percent reduction of platoons between the terminal points of the section for different traffic volumes was estimated (Fig. 3). According to the results the traffic volume has little effect on discharging platoons on sections including passing relief lane. Moreover, the length of the passing lane was found to influence the traffic performance. The percentage of passing vehicles was high in the case of longer passing lanes (31.6%-52.2%) with only 16.8% passing vehicles on sections with 550 m long passing lanes (Fig. 4). However, with a considerable percentage of passing vehicles the dispersion of platoons is low (Table 2).

Table 2. Empirical results for sections with additional overtaking lane

Tablica 2. Zestawienie wyników badań empirycznych dla odcinków z dodatkowym pasem do wyprzedzania

Section Odcinek	Section length Długość odcinka [m]	Mean speed of travel Średnia prędkość podróży [km/h]		Mean percentage of overtaking vehicles Średni udział procentowy pojazdów wyprzedzających [%]	Mean reduction of platoon traffic Średnia redukcja udziału ruchu kolumnowego [%]	Platoon size [Veh./platoon] Wielkość kolumn pojazdów [Poj./kolumnę]	
		overtaking lane pas do wyprzedzania	right lane prawy pas			before section przed odcinkiem	after section za odcinkiem
1	800	83.3	63.9	39.9	8.8	3.86	3.49
2	700	87.6	68.9	31.6	6.0	2.98	3.23
2	1000	82.7	67.1	52.2	10.2	3.56	3.49
4	600	83.3	66.3	43.3	4.7	3.20	3.37
5	550	95.0	76.3	16.8	3.7	3.01	3.07

Ze względu na występowanie krótkich odcinków z dodatkowym pasem ruchu, szczególną uwagę zwrócono na efektywność rozładowania kolumn pojazdów. W badaniu szacowano średnią procentową redukcję udziału ruchu kolumnowego pomiędzy końcem i początkiem odcinka dla różnych wartości natężenia ruchu (Rys. 3). Wyniki wskazują na mały wpływ natężenia ruchu na redukcję ruchu kolumnowego na odcinku z dodatkowym pasem do wyprzedzania. Zaobserwowano również wpływ długości pasa do wyprzedzania na warunki ruchu. Odnotowano wysoki udział wyprzedzających pojazdów w przypadku dłuższych odcinków (31,6%-52,2%) w porównaniu do krótszego odcinka o długości pasa 550 m (16,8%) (Rys. 4). Pomimo znacznego udziału wyprzedzających pojazdów, odnotowano niską redukcję kolumn pojazdów (Tabl. 2).

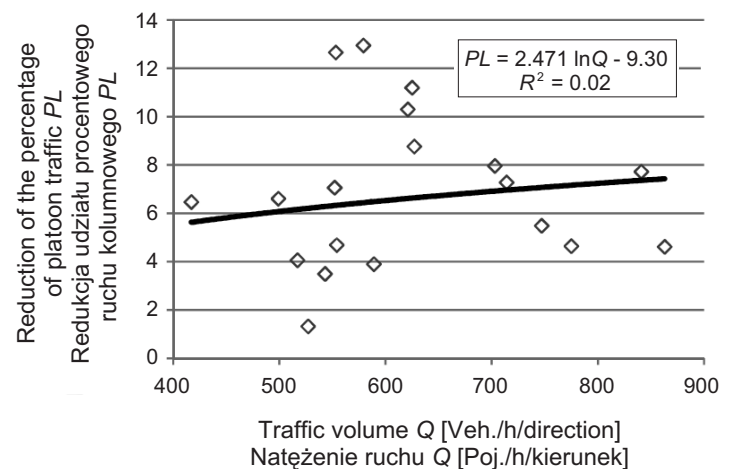


Fig. 3. Influence of the traffic volume on the percentage of platoon traffic between the start and end of section with additional lane

Rys. 3. Wpływ natężenia ruchu pojazdów na zmianę udziału ruchu kolumnowego między końcowym i początkowym przekrojem odcinka drogi z dodatkowym pasem

4. ŚRODKOWY PAS WIELOFUNKCYJNY

Jednym z istotnych czynników uwzględnianych przy przebudowie sieci dróg 1x2 jest ich dostępność. Nadmierna dostępność wynika z braku hierarchicznej sieci drogowej oraz z uwarunkowań prawnych, zapewniających bezpośredni dostęp do dróg publicznych. Wymusza to stosowanie rozwiązań niepozwalających na w pełni kontrolowaną dostępność do drogi. W efekcie konieczne jest stosowanie rozwiązań ograniczających jej negatywny wpływ. W przekrojach 1x2 o szerokich poboczach utwardzonych oraz na drogach o przekrojach 1x4 pasy przebiegających przez małe miejscowości są wprowadzane środkowe pasy wielofunkcyjne. Umożliwiają one poprawę warunków ruchu, głównie przez ograniczenie zatrzymań i liczby zakłóceń w ruchu. Takie rozwiązania zostały wdrożone w kilku miejscach [6-8]. Parę lat eksperymentalnego i pozytywnego użytkowania takich pasów dały podstawę do sformułowania wytycznych projektowych. W Polsce wprowadzono kilka form wielofunkcyjnych pasów ruchu i różnych sposobów ich znakowania. Po okresie zbierania doświadczeń, obecnie można sformułować zunifikowane zasady oznakowania i użytkowania tych pasów. Przykład przedstawiony na Rys. 5 pochodzi z województwa lubelskiego.

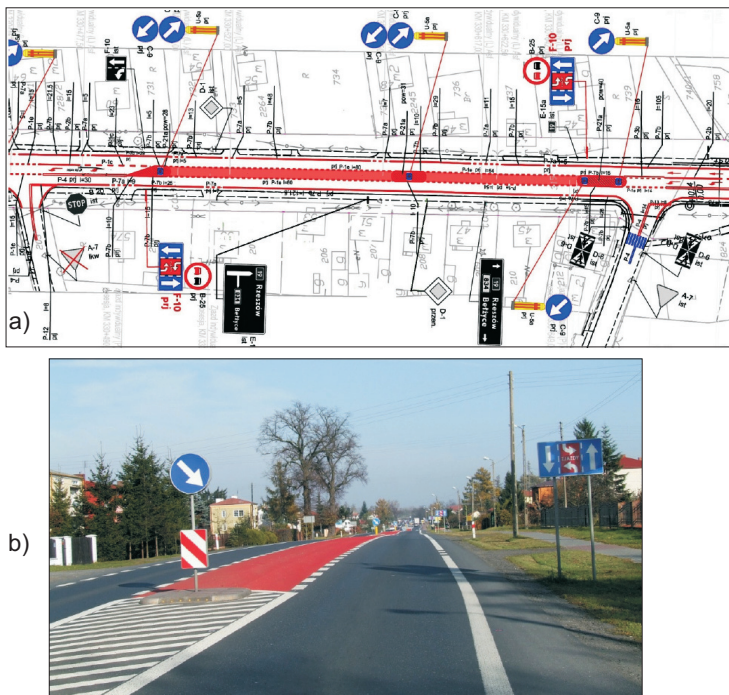


Fig. 5. Example of experimental multifunctional median lane including special signage (GDDKiA Lublin): a) top view, b) view Rys. 5. Przykład doświadczalnego odcinka drogi z pasem wielofunkcyjnym ze specjalnym oznakowaniem (GDDKiA Lublin): a) rzut z góry, b) widok

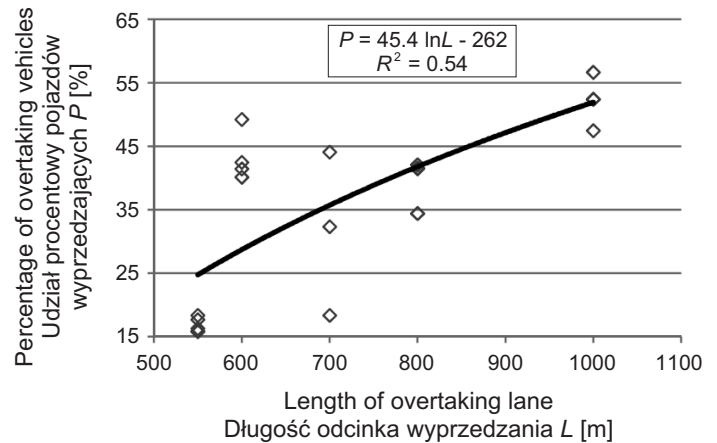


Fig. 4. Influence of the overtaking lane length on the percentage of overtaking movements

Rys. 4. Wpływ długości odcinka wyprzedzania na udział procentowy manewrów wyprzedzania

4. MULTIFUNCTIONAL MEDIAN LANE

One of the important factors considered in the scheme to upgrade the 1x2 road network are the access conditions. Excessive access results from the lack of hierarchical road network system and the regulations guaranteeing direct access to public roads from the abutting properties. This prevents implementing full access control on the roads. As such, it is necessary to resort to arrangements limiting the undesired effects of such excessive accessibility. These arrangements include the multifunctional median lane introduced in two-lane roads including paved shoulders and in four-lane roads. These lanes improve the traffic conditions, mainly by reducing the number of disruptions and disturbance to through traffic. So far, this arrangement has been implemented in a few places [6-8]. Based on a few years of satisfactory operation it was possible to derive the design guidelines. The multifunctional median lane introduced so far in Poland differ in terms of design and signage. Based on the acquired knowledge it is not possible to formulate uniform signage and use guidelines. Fig. 5 presents an example of multifunctional median lane implemented on the existing road in the province of Lublin (in the south-eastern part of Poland).

The multifunctional median lanes design options include:

- method of separating the two directions of traffic, i.e.: surface variation (bituminous vs. concrete block paving), raising in relation to the lane, different colour (contrasting or grey), permitted or prohibited passing (as indicated by pavement markings),

Wprowadzane wielofunkcyjne pasy różnią się przede wszystkim:

- sposobami separacji ruchu w dwóch kierunkach, tj.: rodzajem nawierzchni (asfalt lub kostka betonowa), wyniesieniem w stosunku do poziomu pasa ruchu lub jego brakiem, kolorem (kolor kontrastowy w stosunku do jezdni albo kolor szary), możliwością wyprzedzania lub jego zakazem (poprzez odpowiednie oznakowanie poziome),
- rozstawem wysp dzielących na pasie środkowym.

Dla oceny możliwości stosowania jednolitych zasad tworzenia odcinków dróg ze środkowym pasem wielofunkcyjnym, przeprowadzono następujące badania:

- wpływu rozstawu wysp środkowych na bezpieczeństwo ruchu drogowego,
- wpływu zakazu wyprzedzania na odcinku z pasem środkowym na zachowania kierujących.

Głównymi celami wprowadzenia wysp środkowych na pasie wielofunkcyjnym są:

- użycie ich w celu zapewnienia bezpiecznego wykonywania manewrów skrętu w lewo z drogi nadrzędnej bez blokowania ruchu lub skrętów w lewo z wjazdów bocznych,
- fizyczne ograniczenie możliwości korzystania z dodatkowego pasa do realizacji manewru wyprzedzania,
- wykorzystanie tego pasa jako wyspy azylu dla pieszych.

Przeprowadzone analizy bezpieczeństwa ruchu wskazują, że gęstość wysp ma istotny wpływ na liczbę i rodzaj wypadków (Rys. 6). Przedstawione wyniki analiz obejmują poligony z wyspami zlokalizowanymi w rozstawie od 75 m do 400 m. Wyznaczona linia trendu wskazuje na związek pomiędzy wzrostem odległości między wyspami a gęstością wypadków (Rys. 6a). Podobną zależność, ale o mniejszej wartości współczynnika determinacji uzyskano dla zmienności względnego wskaźnika wypadkowego (Rys. 6b). Na wyniki może istotnie wpływać kilka innych czynników, jak np. struktura ruchu, możliwość wyprzedzania na odcinkach poprzedzających, jednakże te czynniki nie były szczegółowo analizowane. Zbadano również jak rozstaw wysp wpływa na gęstość zderzeń czołowych i uderzeń w przeszkodę na odcinku z dodatkowym pasem ruchu (Rys. 6c). Zderzenia czołowe są charakterystyczne dla manewru wyprzedzania z wykorzystaniem przeciwnego pasa ruchu, natomiast wypadki związane z uderzeniem w przeszkodę są typowe dla odcinków dróg z elementami fizycznie ograniczającymi ruch, takimi jak wyspy uspokajające ruch.

- spacing of the separating islands on a median lane.

The following elements were analysed in order to verify the possibility to introduce uniform design principles for roads including multifunctional median lane:

- influence of spacing between separating islands on the safety of traffic,
- influence of the passing prohibition on the drivers' behaviour on the sections including the multifunctional median lane.

The main function of the separating islands is to:

- ensure safety of left turn movements from the major road without blocking the through traffic or left turn movements from the driveways,
- prevent the drivers from using the lane for passing,
- enable using the median lane as pedestrian refuge.

The traffic safety analyses demonstrated that the density of islands has a significant effect on the number and types of accidents (Fig. 6). The results of analyses presented in this paper comprise polygons with islands spaced by 75-400 m. The trend line shows a relationship between the increase in the spacing of islands and the density of accidents (Fig. 6a). A similar relationship yet with a smaller coefficient of determination value was obtained for the variation of the relative accident ratio (Fig. 6b). There are a number of additional factors which were not considered and can significantly influence the results, including the traffic composition, permitted passing on the upstream sections. The analysis included investigating the influence of the island spacing distance on the density of head-on crashes and hitting into objects on the sections including additional multifunctional median lane (Fig. 6c). Head-on crashes are typically associated with passing by using the oncoming lane and hitting into objects occurs on sections provided with traffic control devices, such as traffic calming islands.

The results of the above-described analyses clearly showed an increase in the accident indices with the increasing distance between the separating islands. Head-on crashes are typically associated with passing by using the lane on which traffic in opposite direction is permitted and hitting into objects occurs most often on sections including traffic calming islands. Passing can be efficiently discouraged by optimum spacing of median lane islands. This was determined using a theoretical passing model developed with the following input assumptions:

- platoon traffic with the leader car blocking the following vehicles,

Opisane powyżej wyniki analiz jednoznacznie wskazują, że wartość wskaźników wypadkowych rosła wraz ze wzrostem rozstawu wysp. Wypadki czołowe są charakterystyczne dla manewru wyprzedzania na pasie, na którym możliwy jest ruch w przeciwnym kierunku, natomiast najechanie na przeszkodę związane jest zwykle z występowaniem wysp uspokojenia ruchu w przekroju jezdni. W celu ograniczenia możliwości wyprzedzania koniecznym jest wyznaczenie optymalnej odległości między wyspami w pasie środkowym. Dla wyznaczenia tej odległości skorzystano z modelu teoretycznego wyprzedzania pojazdów, w którym założono:

- występowanie ruchu kolumnowego – lider „blokuje” pojazdy jadące za nim,
- pojazd wyprzedzający, podczas wykonywania manewru, porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem o wartości a ,
- po osiągnięciu założonej wartości prędkości V_1 , pojazd wyprzedzający porusza się ruchem jednostajnym (za V_1 przyjęto kwantyl 85% prędkości z wartości rejestrowanych w przekrojach z pasem wielofunkcyjnym, tj. 71 km/h),
- możliwość wyprzedzania wyłącznie pojazdów jadących bardzo wolno (np. pojazdy rolnicze), tj. z prędkością mniejszą niż kwantyl 5% z wartości rejestrowanych prędkości w przekrojach z pasem wielofunkcyjnym (41 km/h).

Odległość między dwoma sąsiadującymi ze sobą wyspami D_{isl} powinna być dobrana w taki sposób, by wyprzedzanie pojazdów wolno jadących było możliwe, ale równocześnie by uniemożliwić wyprzedzanie pojazdów jadących z większą prędkością. Przy uwzględnieniu realnych możliwości osiągnięcia przyspieszenia przy założonej prędkości, wyznaczono wartość D_{isl} na poziomie 90 m. Taka odległość daje możliwość bezpiecznego wyprzedzenia pojazdów wolno jadących, a jednocześnie nie pozwala na wykonanie lub poważnie utrudnia ten manewr, gdy prędkość w ruchu kolumnowym wynosi ponad 50 km/h (Rys. 7).

Z analizy można wywnioskować, że im mniejsza wartość gęstości wysp, tym większe bezpieczeństwo ruchu drogowego. Przy zbyt małej gęstości wysp kierowcy często wykorzystują do wyprzedzania środkowy pas i poruszają się ze zbyt dużymi prędkościami. Prowadzi to do zwiększenia liczby wypadków. Na podstawie obserwacji liczby wypadków, można stwierdzić, że na odcinkach dróg z wielofunkcyjnym pasem środkowym, po jego wprowadzeniu obserwuje się zmniejszenie liczby wypadków do 30% wartości początkowej. Wprowadzenie wielofunkcyjnego pasa jest zatem bardzo korzystne na odcinkach dróg przechodzących przez

- during passing the vehicle moves with uniform acceleration of a ,
- upon reaching the target speed of V_1 the passing vehicle continues to move with a constant speed (V_1 was taken as 85% quantile of speeds recorded at the multifunctional median lane sections, i.e. 71 km/h),
- passing of very slow moving traffic (such as farming equipment), i.e. at speeds lower than 5% quantile of speeds recorded at the multifunctional median lanesections, i.e. 41 km/h).

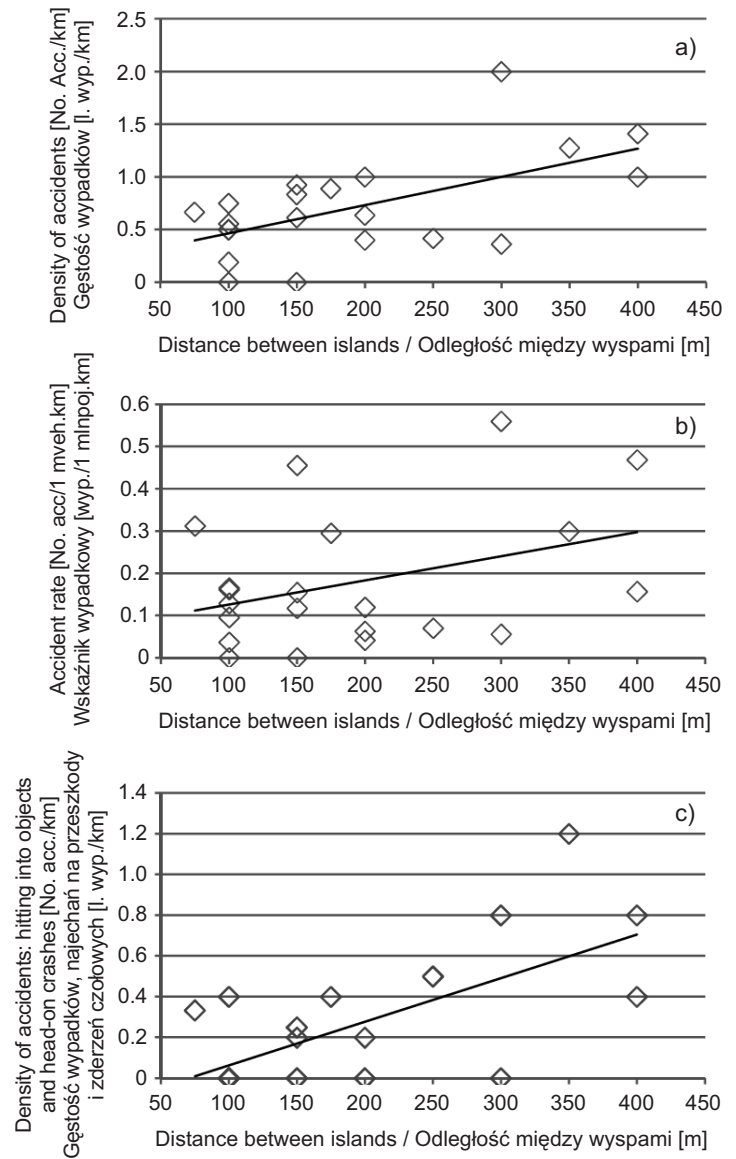


Fig. 6. Number of road accidents vs. distance between the multifunctional median lane separating islands
Rys. 6. Zależność między wypadkami drogowymi a odległością między wyspami na środkowym pasie wielofunkcyjnym

małe miejscowości zamiast przekroju 1×2 z szerokimi utwardzonymi poboczami. Z tego też powodu dużą wagę przywiązuje się do stworzenia i wprowadzenia jednolitych wytycznych projektowych w tym zakresie. Wzór rozwiązania przebudowy przekroju wraz z jego oznakowaniem (czerwoną powierzchnią i specjalnym znakiem pionowym) oraz przykład zastosowania pokazany jest na Rys. 5.

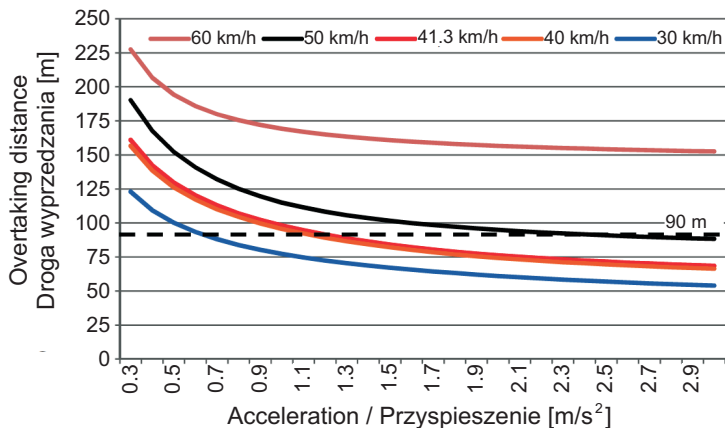


Fig. 7. Overtaking distance vs. acceleration

Rys. 7. Zależność długości drogi wyprzedzania od wartości przyspieszenia

5. WNIOSKI

Wraz z budową nowych autostrad i dróg ekspresowych zmieniły się funkcje pełnione przez dwupasowe, dwukierunkowe drogi krajowe klas GP i G. Generalnie zmianie uległa również charakterystyka ruchu, lecz nie jego natężenia. W celu poprawy bezpieczeństwa i warunków ruchu drogowego przebudowywane są drogi przebiegające w terenie zabudowanym oraz odcinki dróg 1×2 z utwardzonymi poboczami. Pewne trudności w procesie przebudowy są związane z polityką: dostępności do drogi, obsługi zagospodarowania otoczenia drogi, rozwoju ciągów dla pieszych i rowerzystów oraz potrzebą stosowania ekranów akustycznych.

W celu realizacji programu budowy obwodnic, a także ze względu na ich szczególny charakter, konieczne jest wprowadzenie podręcznika dobrych praktyk dla projektantów. Wszystkie obowiązujące przepisy i zalecane procedury projektowania obwodnic na głównych drogach (z wyjątkiem autostrad) o przekrojach: 2+1 i 1×2 (z utwardzonymi poboczami o szerokości 1,5-2,0 m) uwzględniają ich szczególny charakter tylko w niewielkim stopniu. Ten szczególny charakter obwodnic jest ściśle związany z:

- strukturą ruchu, tj.: przewagą ruchu dalekobieżnego, przy niskim udziale wolno poruszających się pojazdów i ograniczonym udziale niechronionych użytkowników dróg,

The distance between two neighbouring islands D_{isl} should allow passing slow moving vehicles while preventing passing of vehicles moving at faster speeds. Taking into account the practically attainable accelerations for the assumed target speed the 90 m distance between islands was obtained. This distance enables safe passing of slow moving vehicles while preventing or at least significantly discouraging overtaking of platoons travelling faster than 50 km/h (Fig. 7).

It can be concluded that the smaller the density of islands the greater the safety of traffic. With too small intervals between the islands drivers tend to use the centre lane for passing and, moreover, travel with excessive speeds. The number of accidents increases as a result. According to the traffic counts, introduction of the multifunctional median lane decreases the number of accidents by 30% in relation to the initial number. Therefore, retrofitting the 1×2 roads including wide paved shoulders with multifunctional median lane is considered most favourable for the highway sections running through villages and small towns. This explains the attention devoted to developing and implementing uniform design guidelines in this respect. Fig. 5 presents the plan of such conversion, including appropriate signage (red colour surfacing and special upright sign) and as-built situation on the road.

5. CONCLUSIONS

The Polish motorway and expressway construction scheme has brought changes to the functions of two-way single national roads of GP and G class. While the traffic composition has also changed, the traffic volumes have generally remained the same. There is also an upgrading scheme underway for the road sections running through built-up areas and sections of 1×2 roads including paved shoulders to improve the safety and traffic performance. There are some challenges involved which are related to policy issues including ensuring of access to public roads, serving the area in the vicinity of the road, development of pedestrian and cycle paths and noise protection requirements.

In relation to the bypass construction scheme it has become necessary to develop best practice guidelines for designers, taking into account specific nature of the bypass sections. This, however, has not been sufficiently considered in the existing regulations and in the recommended practices for designing bypasses on trunk roads (other than motorways) of 2+1 and 1×2 type (including paved shoulders of 1.5-2.0 m in width). The specific nature of bypass sections is related to:

- b) wysokimi prędkościami i ich dyspersją, prowadzącą do wzrostu zapotrzebowania na wyprzedzanie, zarówno na odcinkach poprzedzających obwodnice, jak i na ich długości,
- c) wyraźnym oczekiwaniem lepszych warunków ruchu i możliwości łatwego wykonywania manewrów wyprzedzania w porównaniu do innych odcinków o przekroju 1×2,
- d) koniecznością połączenia istniejącej sieci drogowej z projektowaną obwodnicą przez skrzyżowania na końcach obwodnicy, biorąc pod uwagę wysokie dysproporcje ruchu na wlotach tych skrzyżowań oraz wysoką prędkość pojazdów,
- e) możliwością zaprojektowania odcinków dróg z pełną kontrolą dostępności,
- f) łatwiejszym doбором przekrojów poprzecznych w porównaniu z przebudową istniejącej sieci drogowej,
- g) koniecznością wprowadzenia środków ochrony środowiska, która jest w tym przypadku łatwiejsza.

Dalsze badania nad przebudową dwupasowych dróg dwukierunkowych powinny obejmować:

- 1) ocenę efektywności i możliwości projektowania, a także eksploatacji dróg 2+1 oraz odcinków z dodatkowymi pasami do wyprzedzania,
- 2) ocenę wpływu przekroju z dodatkowym pasem wielofunkcyjnym na bezpieczeństwo ruchu drogowego oraz na jego funkcjonowanie, biorąc pod uwagę czynniki związane z rozwojem otaczającej infrastruktury,
- 3) ocenę wpływu różnych rodzajów skrzyżowań i węzłów na bezpieczeństwo i poprawę warunków ruchu na obwodnicach.

INFORMACJE DODATKOWE

W artykule przedstawiono niektóre wyniki projektu badawczego „Narzędzia wspomagające decyzje przy projektowaniu obwodnic i przebudowie przejść drogowych przez miejscowości” (NR10-0067-10) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Tracz M., Woźniak K., Buczek P.*: Rola obwodnic w poprawie klimatu akustycznego otoczenia przejść drogowych przez miasta. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Kraków, 2014

- a) specific composition of traffic, namely prevailing percentage of long-distance traffic and small percentage of slow moving vehicles, as well as a limited number of vulnerable road users,
- b) high speeds and their dispersion leading to increase passing demand on the bypasses and their preceding sections,
- c) clearly articulated expectation of better driving conditions and easier passing as compared to other 1×2 road sections,
- d) the required connection of the existing road network with the planned bypass through terminal junctions, taking into account large differences in the traffic on the approaches and high driving speeds,
- e) permitted full access control,
- f) more cross-section design options as compared to upgrading of existing road systems,
- g) easier implementation of the required environmental protection measures.

There is a need to continue the studies on upgrading the two-lane single roads which should cover:

- 1) evaluation of the performance and design as well as operation options for the 2+1 roads and sections with passing relief lanes,
- 2) evaluation of the improvement of road safety and traffic performance resulting from retrofitting the multifunctional median lane, taking into account the factors related to the development of the surrounding infrastructure,
- 3) evaluation of the influence of different intersection and interchange types on the safety and traffic performance.

ACKNOWLEDGEMENT

The paper presents chosen outputs of the research project paper “The decision support tools in the design and reconstruction of bypasses and roads passing through small town” (NR10-0067-10) supported by the Polish National Centre for Research and Development.

- [2] Highway Safety Manual (HSM). First Edition. FHWA American Association of State Highway and Transportation Officials, U.S.A., 2010

-
- [3] Kirby P., Koorey G., Wilmshurst B.: Operating characteristics and economic evaluation of 2+1 lanes with or without intelligent transport systems assisted merging. NZ Transport Agency Research Report 549, New Zealand, 2014
- [4] Irzik M.: Layout of 2+1-routes in Germany - New findings. 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia, Spain, 2-5 June 2010
- [5] Lee S., Kim Y.R., Moon J.P., Choi J.S.: Operational Analysis of 2+1 Roadway and its Use in Developing Geometric Design Standards in South Korea. 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia, Spain, 2-5 June 2010
- [6] Tracz M., Gaca S.: Recent Developments in Highway Geometric Design in the Reconstruction of the Polish Road Network - Country Report. 4th International Symposium on Highway Geometric Design, Valencia, Spain, 2-5 June 2010
- [7] Kieć M., Tracz M., Gaca S.: Design of Cross section on Road Through Built-up Areas. Archives of Civil Engineering, **LVIII**, 3, 2012, 243-257
- [8] Gaca S., Tracz M.: Two-lane Roads with Multifunctional Median Lane. Elsevier Procedia - Social and Behavioral Sciences, **53**, 2012, 801-810