

Effectivness of using neighborhood traffic circles in traffic calming

Skuteczność stosowania rond typu pineska w uspokojeniu ruchu

Abstract: Limiting the speed of traffic by introducing reduced speed zones is one of the most effective methods of improving road safety. Built-up areas, and especially housing estates, are among the most sensitive locations at which prescribed speed limits should not be exceeded. That is where additional calmed traffic zones are introduced. In such zones, in addition to administrative speed limits, supplementary road infrastructure elements are relied upon that physically force traffic participants to reduce their speed (e.g. speed humps or roundabouts with a raised island). This article aims to analyze the effectiveness of traffic circles used in calmed traffic zones in order to reduce the speed of road users. Three study areas located in north-eastern Poland have been selected, with calmed traffic zones established therein more than 20 years ago. Research consisted in measuring the free-flow speed on selected streets. Geometrical and height-related parameters of roundabouts located along those streets were determined, and factors characterizing the streets in question and their closest surroundings were analyzed. Statistical analysis of data obtained through the measurements has revealed some complex dependencies between speed reduction and selected roundabout parameters, such as the height of the raised island at a given traffic circle or the length of the approach to the junction. The analysis conducted has also allowed to identify the remaining determinants that may effectively contribute to reducing the speed of vehicles and maintaining their lower velocity in calmed traffic zones.

Keywords: central island, reduce speed, streetscape character approach, street function, swept path, traffic calming, traffic circle.

Streszczenie: Jedną z najskuteczniejszych metod poprawy bezpieczeństwa ruchu na drogach jest redukcja prędkości poprzez ustanowienie stref z dopuszczalnym limitem prędkości. Miejscami, w których szczególnie nie powinno dochodzić do przekraczania wyznaczonego limitu prędkości są tereny zabudowane, a zwłaszcza osiedla mieszkaniowe. W lokalizacjach tych wydziela się dodatkowo strefy ruchu uspokojonego, w których oprócz administracyjnego limitu prędkości stosuje się na ulicach dodatkowe elementy infrastruktury komunikacyjnej wymuszające fizyczne ograniczenie prędkości (progi zwalniające czy skrzyżowania z ruchem okrężnym wokół wyniesionej wyspy). Celem artykułu jest analiza skuteczności zastosowania w strefach ruchu uspokojonego rond typu pineska na redukcję prędkości. Do analizy wybrano trzy obszary badawcze zlokalizowane w północno-zachodniej Polsce, w których strefy uspokojenia ruchu na drogach wprowadzono już ponad dwadzieścia lat temu. W ramach badań zmierzono prędkości w ruchu swobodnym wzdłuż wybranych ulic, określono parametry geometryczne i wysokościowe rond usytuowanych na tych ulicach, a także przeanalizowano czynniki charakteryzujące wytypowane ulice i najbliższe ich otoczenie. Analizy statystyczne danych uzyskanych na podstawie pomiarów wykazały złożone zależności redukcji prędkości od wybranych parametrów rond, takich jak wysokość wyniesienia powierzchni wyspy ronda typu pineska czy długość dojazdu do skrzyżowania. Na podstawie przeprowadzonych analiz określono także pozostałe determinanty, które mogą skutecznie przyczynić się do redukcji prędkości pojazdów i utrzymania w strefach ruchu uspokojonego ich zmniejszonej prędkości.

Słowa kluczowe: funkcja ulicy, korytarze ruchu, redukcja prędkości, rondo typu pineska, uspokojenie ruchu, wyspa środkowa, zagospodarowanie wlotów.

¹⁾ West Pomeranian University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, 50 Piastów Av., 70-311 Szczecin, Poland; stanislaw.majer@zut.edu.pl

1. INTRODUCTION

Excessive speed is one of the principal factors that contributes to decreased road safety and aggravates the outcomes of road accidents [1-6]. Therefore, the introduction of reduced speed zones whose parameters are aligned with the roles specific streets play in the overall transportation network is of such great significance [7]. Suburbs and areas in which residential estates dominate are of particular importance in this context, and it is there that traffic calming measures have been gaining in popularity. Those solutions may take the form of 30 km/h zones or home zones. In the suburbs of larger cities, 30 km/h zones are the preferred solution, while home zones prevail in housing estates with detached or multi-family buildings. The practice of using calmed traffic zones shows that while planning solutions of this type, one should also take into consideration the manner in which the surroundings are landscaped, the function of a given street, the terrain and the dimensions of design vehicles [1-6, 8]. Having conducted an in-depth analysis of the degree to which those various factors impact the speed of vehicles, the authority managing a given zone may select specific traffic calming measures to be deployed [1, 3-6, 9]. Various means and methods are relied upon to calm the traffic, both along the streets and at junctions [4, 10-11]. To achieve the goal of reducing speed, raised intersections or circular junctions such as mini-roundabouts and traffic circles are constructed at intersecting streets. Such solutions have been in use, in residential areas in Western Europe (especially in Scandinavia and Benelux countries, but also in the USA and Canada), since the 1990s. Their introduction in Poland commenced at the same time as well [10-14]. Traffic circles are characterized by a central island whose diameter is much smaller than in the case of a mini roundabout. Their traffic islands are usually traversable, do not require the use of any splitter islands, the widening of approaches or using A-7 and C-12 signs [10-11]. In some exceptional cases, where a very small non-traversable traffic island is used, C-9 signs are used at such traffic circles. Other signs, e.g. A-7 or D-4, may be placed on the approaches as well. However, traffic calming measures, especially when used in home zones, may cause some problems with both the flow of traffic and the mobility of local residents [15-16]. For instance, the use of speed bumps, median islands, non-traversable central islands or traversable, raised central islands may adversely affect the freedom of movement of residents, thus reducing their mobility.

1. WPROWADZENIE

Jednym z najważniejszych czynników powodujących zmniejszenie bezpieczeństwa ruchu oraz zwiększenie skutków zdarzeń drogowych jest nadmierna prędkość [1-6]. Fakt ten powoduje, że istotnym zagadnieniem związanym z poprawą bezpieczeństwa jest strefowanie prędkości, zgodne z funkcją danej ulicy przewidzianą w układzie komunikacyjnym [7]. Szczególnymi obszarami są w tym kontekście przedmieścia i tereny z dominującą zabudową mieszkalną, w których coraz częściej wprowadza się uspokojenie ruchu. Mogą to być strefy ograniczonej prędkości 30 lub strefy zamieszkania. Na przedmieściach większych miast stosuje się raczej strefy 30, a w osiedlach mieszkaniowych przy zabudowie jedno- lub wielorodzinnej - strefy zamieszkania. Praktyka stosowania stref uspokojenia ruchu wskazuje, że podczas ich planowania przestrzennego powinno się uwzględniać także zagospodarowanie otoczenia, funkcję danej ulicy, warunki terenowe oraz pojazdy miarodajne [1-6, 8]. Zarządca danej strefy po wnikliwej analizie stopnia wpływu tych różnorodnych czynników na prędkości pojazdów może podejmować decyzję o doborze odpowiednich środków uspokojenia ruchu [1, 3-6, 9]. Stosuje się różne metody i środki uspokojenia ruchu zarówno na ulicach, jak i na samych skrzyżowaniach [4, 10-11]. W tym celu na przecinających się ulicach buduje się wyniesione skrzyżowania lub skrzyżowania o ruchu okrężnym w postaci mini rond, jak i rond typu pineska. Są one stosowane są już od lat 90. ubiegłego wieku w strefach zamieszkania w Europie Zachodniej (szczególnie w Skandynawii i krajach Beneluksu), a także w USA i Kanadzie. W tym samym czasie zaczęto je wdrażać również w Polsce [10-14]. Ronda typu pineska charakteryzują się znacznie mniejszymi średnicami wyspy środkowej niż typowe mini rondo, przeważnie mają tę wyspę przejezdną, nie wymagają stosowania wysp dzielących oraz poszerzania wlotów i stosowania znaków A-7 i C-12 [10-11]. W wyjątkowych przypadkach na rondach tych przy bardzo małej nieprzejezdnej wyspie środkowej stosuje się na niej znaki C-9. Mogą być także na wlotach ustawione inne znaki, np. A-7, D-4. Zastosowane uspokojenie ruchu, szczególnie w strefach zamieszkania, może powodować jednak pewne problemy zarówno z płynnością ruchu, jak i mobilnością mieszkańców [15-16]. Na przykład zastosowanie progów zwalniających, pasów dzielących lub wysp dzielących, wysp środkowych nieprzejezdnych lub wyniesionych wysp przejezdnych może skutecznie wpłynąć na zmniejszenie

Having analyzed the available guidelines and scientific works, the author has determined that publications [1, 3-6, 8] and other studies [17-19] lack the summary of an in-depth analysis of the effectiveness of traffic circles. The speed reductions achieved thanks to them are not documented properly, and the principles according to which raised central islands should be used (and how high they should be relative to the road surface) are not formulated in a precise manner.

In the opinion of the author, the existing guidelines concerning traffic circles should be supplemented with additional recommendations on when raised central islands should be used if such a solution is deployed. This was the main objective of the research described in the present article.

The article is divided into five distinct parts. Following the introduction and a review of the literature, chapter 2 describes the selected study areas as well as presents the assumptions made and the research methods relied upon. Chapter 3 presents the traffic parameters obtained, while chapter 4 discusses the results of the study. In the last chapter, conclusions are drawn based on the analysis of the results obtained.

2. KEY ASSUMPTIONS AND SUBJECT OF RESEARCH

Before commencing the project, taking into account conclusions from the literature review, the author analyzed several dozen existing traffic calming zones located in the suburban areas and in smaller towns of the West Pomeranian voivodeship in Poland. 30 kph zones and home zones were considered, with the author looking for the most typical layouts incorporating traffic circles along streets distributing vehicle traffic. However, due to the area of planned research being so wide, a basic study assumption that would ensure a homogeneous nature of the analyzed data needed to be made [20]. In accordance with the primary assumption of the experiment theory [20-21], three study areas were selected (Fig. 1) representing typical traffic calming measures. All study areas were commissioned over 20 years ago and are paved with concrete blocks. The individual traffic circles differed, however, in terms of geometry, shape, height of the central island, landscaping of the surrounding streets and their functions.

The first study area was a home zone located in Międzywodzie – a small seaside resort in which a paid parking

swobody ruchu mieszkańców, czyli ograniczenie ich mobilności.

Przeprowadzona analiza dostępnych autorowi wytycznych i publikacji naukowych pozwoliła stwierdzić, że w wytycznych [1, 3-6, 8] i badaniach naukowych [17-19] brakuje rezultatów wnikliwej oceny skuteczności stosowania rond typu pineska, udokumentowania wyników otrzymywanych na nich redukcji prędkości, a także sformułowanych precyzyjnie zasad, kiedy oraz w jakich warunkach należy stosować wyniesione wyspy środkowe i na jaką wysokość w stosunku do płaszczyzny jezdni.

Według autora w odniesieniu do rond typu pineska potrzebne jest uzupełnienie istniejących zaleceń w zakresie wskazania, kiedy powinno się stosować wyniesione wyspy środkowe na takich rondach. Zagadnienie to stanowiło główny cel badań prezentowanych w niniejszym artykule.

Artykuł składa się z pięciu części. Po wprowadzeniu zawierającym przegląd literatury, w rozdziale 2 opisano wybrane obszary badawcze oraz przedstawiono założenia i zastosowane metody badań. W rozdziale 3 przedstawiono otrzymane wyniki warunków ruchu, a w rozdziale 4 przeprowadzono dyskusję otrzymanych rezultatów badań. W ostatnim rozdziale na podstawie przeprowadzonej w artykule analizy wyników pomiarów sformułowano wynikające z nich wnioski.

2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA I PRZEDMIOT BADAŃ

Przed przystąpieniem do badań, po uwzględnieniu konkluzji z przeprowadzonego przeglądu literatury przeanalizowano kilkadziesiąt istniejących stref uspokojenia ruchu na przedmieściach miast i w mniejszych miejscowościach województwa zachodniopomorskiego. Pod uwagę wzięto tzw. strefy 30 i strefy zamieszkania, poszukując najbardziej typowych układów komunikacyjnych, w których zastosowano ronda typu pineska wzdłuż ulicy rozprzeczającej ruch pojazdów. Tak szeroki zakres obszaru planowanych badań wymagał jednak przyjęcia podstawowego założenia badawczego, które pozwoliłoby zapewnić jednorodność analizowanych danych [20]. Zgodnie z podstawowym założeniem teorii eksperymentu [20-21], do badań wybrano trzy obszary badawcze (Rys. 1), reprezentujące typowe rozwiązania stosowane przy uspokojeniu ruchu. Wszystkie badane obszary zostały oddane do użytku ponad 20 lat temu i posiadają nawierzchnię

zone was introduced and seven traffic circles were built at the beginning of the 21st century, with the raised central islands varying in terms of height. All streets adjacent to the circles were of the one-way variety, with the carriageway being 5 meters wide. Along the right-hand-side of all of those streets, 2-meter wide parking lanes were available. The surface of the parking lanes was made of openwork concrete slabs. The raised (in all cases) central islands were 4 meters in diameter. The height of the central points of the islands, measured relative to the adjacent roadway surface, ranged from 8 to 17 cm, depending on the street's function and the surrounding land development. It needs to be stressed that the diameter of the traffic circles located along one-way streets did not cover the entire surface area of the junction. This allowed the drivers to pass through the traffic circle without traversing the central island (i.e. passing it on the left or right), depending on the number of vehicles parked in the parking lanes (Fig. 1a). In the figure, the main promenade of the resort is marked. It is used, in the summer season, for markets and weekend events. Additionally, small food and retail outlets are located in the vicinity thereof.

The second study area had the form of a home zone located in a housing estate (with single family homes) in the northern part of the island of Wolin. The said zone was originally designed and built back in 1999 [12]. It was one of the first instances of a home zone actually implemented in the Western Pomeranian voivodeship. Two one-way streets were located within the said area. A total of 9 traffic circles were built there at junctions with three and four approaches. Additionally, four traffic circles were built at dead-end streets that were not connected with other roadways. The width of the two-way carriageway along the main street varied from 6.5 to 7 meters, while the width of the parking lanes equaled 2 m. The parking lanes, located alternately on both sides of the street, were paved with openwork concrete slabs. The study focused on five traffic circles along the main carriageway that distributed traffic throughout the housing estate. The diameter of the raised portions of the traffic circles varied from 5 to 7 meters, while their internal diameters equaled from 2.1 to 3.6 meters. In the case of several traffic circles (depending on the function of a given street and the landscaping of its surroundings), truck aprons and central islands were present as well, made of concrete blocks of varying colors (Fig. 1b). The height of the raised truck aprons varied from 5.6 cm to 14.5 cm, while the height of the central

z kostki betonowej. Poszczególne ronda typu pineska różniły się jednak geometrią, kształtem, wysokością wyspy środkowej, a także zagospodarowaniem ulic w najbliższym otoczeniu i ich funkcją.

Pierwszym obszarem badawczym była strefa zamieszkania zlokalizowana w Międzywodziu w niewielkim uzdrowisku morskim, w którym na początku XXI w. wdrożono strefę płatnego parkowania i wybudowano siedem rond typu pineska, z dużym zróżnicowaniem wysokości wyniesienia wyspy środkowej. Wszystkie ulice w obrębie rond były jednokierunkowe, o szerokości jezdni 5 m i na wszystkich po ich prawej stronie wyodrębniono pasy postojowe szerokości 2 m. Na tych pasach zastosowano nawierzchnię ażurową z płyt betonowych. Zawsze wyniesione wyspy środkowe miały średnicę równą 4 m. Wysokości wyniesienia środka tych wysp w stosunku do przyległej nawierzchni jezdni wahały się w granicach od 8 cm do 17 cm, w zależności od znaczenia ulicy i zagospodarowania najbliższego otoczenia. Należy podkreślić, że w danym przypadku średnica rond na ulicach jednokierunkowych nie obejmowała całej powierzchni skrzyżowania. Umożliwiało to kierowcom przejazd przez rondo z ominięciem wyspy środkowej z lewej lub z prawej strony, w zależności od liczby zaparkowanych pojazdów na pasach postojowych (Rys. 1a). Na wspomnianym rysunku kolorem oznaczono główną promenadę w uzdrowisku, gdzie w okresie letnim odbywają się kiermasze i weekendowe eventy, a wokół którego znajduje się dodatkowo mała gastronomia i obiekty handlowe.

Drugim obszarem badawczym była strefa zamieszkania wydzielona na osiedlu domów jednorodzinnych w północnej części Wolina. Projekt tej strefy wykonano jeszcze w 1999 i w tym samym roku zrealizowano go [12]. Był to jeden z pierwszych projektów strefy zamieszkania wdrożony w województwie zachodniopomorskim. Na omawianym obszarze funkcjonowały ulice dwukierunkowe. Wybudowano na nich dziewięć rond typu pineska na skrzyżowaniach trzy- i czterowłotowych oraz cztery ronda na ulicach bez przejazdu, które nie miały połączenia z inną ulicą. Szerokość dwukierunkowej jezdni na ulicy głównej była zmienna i wahała się w granicach 6,5-7 m, a szerokość wydzielonych pasów postojowych była równa 2 m. Na naprzemiennych pasach postojowych ułożona była nawierzchnia ażurowa. Do przeprowadzenia badań wybrano pięć rond znajdujących się na głównej jezdni, rozprawdzających ruch pojazdów po osiedlu.

islands equaled 5.6 cm to 10.3 cm. As it was the case in the first study area, the central islands did not cover the entire surface area of the intersection. Consequently, vehicles traveling in both directions were traversing, simultaneously, both the island and the circulatory roadway. The fact that approaches on both sides of the circulatory roadway were of different dimensions was another peculiar feature. It was noted, in the course of the research, that the parking lanes were occupied only sporadically, by a few vehicles. The lack of parking vehicles meant that the parking lanes were used as an extended width of the carriageway, which resulted in increased speeds.

The third study area was a two-way street located in a 30 kph zone in the town of Mierzyn, at a residential estate with single- and multi-family homes. This 30 kph zone was also built early in the 21st century. The street to be studied was located on the border with the city of Szczecin, and to be more precise – in its suburbs. The measured width of the carriageway was 5.5 meters. The diameter of the raised portion of each of the traffic circles located along that street equaled 14.9 meters, while internal diameter equaled 5 m. The height of the raised truck aprons varied from 8.4 cm to 10.4 cm, while the height of the central islands equaled 11 cm to 18.5 cm. Various traffic calming measures were deployed along the street in question. Additionally, two non-typical intersections were located there, with side streets leading to home zones. These intersections had, in fact, the form of four-approach roundabouts, with C-9 signs only used on their non-traversable central islands (Fig. 1c). In order to unify the terminology, the said roundabouts are referred to, from now on in this article, as traffic circles. Their parameters differed. Their circulatory roadway was paved with red concrete blocks and covered the entire surface area of the intersections (Fig. 1c). The traffic circle located at the entrance featured a non-traversable central island made of stone blocks, while the other circle, located between raised junctions, an additional truck apron made of grey concrete blocks was present as well.

In order to ensure that the features of the studied streets are homogeneous as well, the first research assumption was made: only those traffic circles that are located along streets distributing traffic within a given zone were selected. The locations of all 14 traffic circles within the 3 study areas are presented in Fig. 1, along with their numbers. The said figure shows also the distances between individual traffic circles and junctions.

Średnice zewnętrznej wyniesionej części rond wahały się w granicach od 5 do 7 m, a średnice wewnętrzne od 2,1 m do 3,6 m. W przypadku kilku rond na ich wyniesionej części zaprojektowano dodatkowo, w zależności od funkcji ulicy i od zagospodarowania najbliższego otoczenia, pierścienie oraz wyspy środkowe z kostki betonowej o różnej kolorystyce (Rys. 1b). Wysokości wyniesienia pierścienia wahały się w granicach od 5,6 cm do 14,5 cm, natomiast wysp środkowych od 5,6 cm do 10,3 cm. Podobnie jak w przypadku pierwszego analizowanego obszaru, wyspy ronda nie obejmowały całej powierzchni skrzyżowania. W rezultacie samochody przemieszczające się w obu kierunkach przejeżdżały częściowo po wyspie oraz po jezdni okrężnej. Drugą charakterystyczną cechą było to, że wloty po obu stronach ronda miały różne wymiary. W trakcie badań odnotowano, że na pasach postojowych rzadko parkowały pojedyncze samochody. Brak zaparkowanych samochodów powodował, że pasy postojowe były wykorzystywane jako dodatkowa szerokość jezdni, co prowadziło do zwiększenia prędkości.

Trzeci obszar badawczy stanowiła dwukierunkowa ulica w strefie 30 w miejscowości Mierzyn, na osiedlu z zabudową jedno- lub wielorodzinną. Tę strefę 30 wdrożono również na początku XXI wieku. Wybrana do badań ulica była zlokalizowana na granicy Szczecina, a precyzyjniej określając – na jego przedmieściach. Zmierzona szerokość jezdni wyniosła 5,5 m. Średnice zewnętrznej wyniesionej części każdego z rond położonych na tej ulicy były równe 14,9 m, a średnice wewnętrzne 5 m. Wysokości wyniesienia pierścienia wahały się w granicach od 8,4 cm do 10,4 cm, a wysp środkowych od 11 cm do 18,5 cm. Na omawianej ulicy znajdowały się różne elementy uspokojenia ruchu i dwa bardzo nietypowe skrzyżowania, gdzie krzyżowały się ulice boczne prowadzące do stref zamieszkania. Były to właściwie czterowlotowe skrzyżowania z ruchem okrężnym, na których zastosowano w obrębie nieprzejezdnej wyspy środkowej jedynie znaki C-9 (Rys. 1c). W celu ujednolicenia stosowanej terminologii w dalszej części artykułu przyjęto określać te ronda jako typu pineska. Miały one różne parametry. Ich jezdnie okrężne wykonane były z czerwonej kostki betonowej i obejmowała zasięgiem całą powierzchnię skrzyżowania (Rys. 1c). Na rondzie wjazdowym usytuowano nieprzejezdną wyspę środkową wykonaną z kostki kamiennej, a na drugim rondzie, położonym pomiędzy wyniesionymi skrzyżowaniami, zastosowano dodatkowo pierścień wykonany z kostki betonowej koloru szarego.

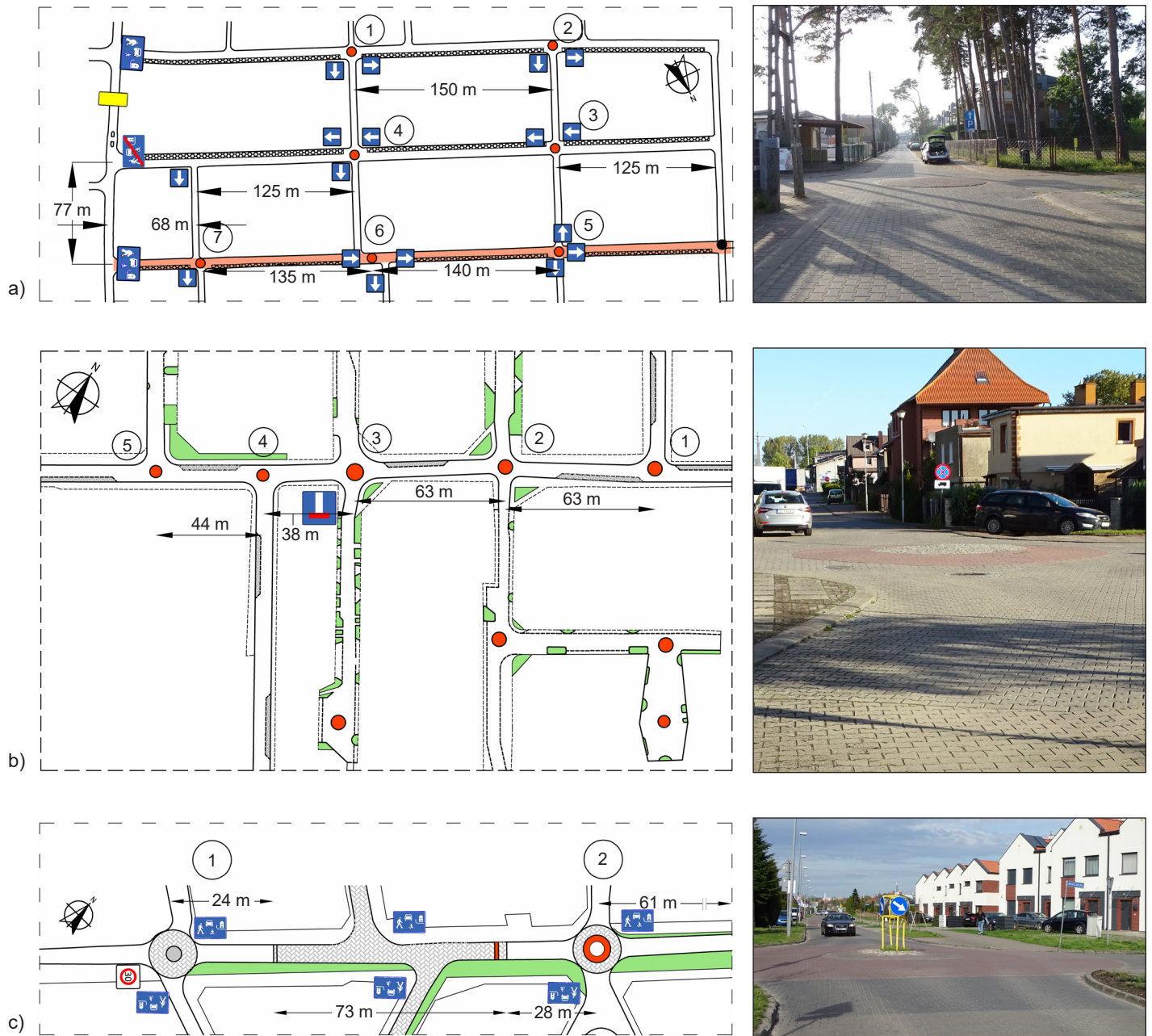


Fig. 1. Study areas selected for the survey with the indicated location of the traffic circles: a) area 1 – Międzywodzie, b) area 2 – Wolin, c) area 3 – Mierzyn

Rys. 1. Wybrane do badań obszary badawcze wraz z lokalizacją analizowanych rond: a) obszar 1 – Międzywodzie, b) obszar 2 – Wolin, c) obszar 3 – Mierzyn

Selection and implementation of the speed measurement method was another of the research assumptions made. Only free-flow traffic was analyzed [22]. Four SR4 electronic sensors (with their internal clocks synchronized) were used to perform the measurements. They verified both traffic intensity and the speed of vehicles moving in

Aby zostało spełnione kryterium jednorodności cech ulic przyjęto pierwsze założenie badawcze: do badań wytypowano ronda znajdujące się na ulicach, rozprawdzających ruch w danej strefie. Rozmieszczenie czternastu rond typu pineska z podziałem na 3 obszary badawcze przedstawiono na Rys. 1, przyporządkowując im odpowiednią

both directions. The sensors were positioned on the approach to, before and after the traffic circle, and at the departure lane. To ensure homogeneity of data, the sensors were always installed at equal distances from the outer edge of the traffic circle. The following were measured: date, time, speed, distance between vehicles expressed in meters and interval between measurements expressed in seconds, vehicle category and direction of travel. As the measurements were made with the resolution of 0.1 s, vehicles constituting free-flow traffic could be selected, assuming a criterion defined in [23, 24], stating that an uninterrupted time interval preceding a given vehicle must equal at least 7 seconds. The measurements were conducted on business days, from 10 am to 4 pm. They were concluded when the last sensor had collected at least 100 measurements that met the free-flow criterion.

The third research assumption was concerned with the homogeneity of hourly traffic volumes that were typical of specific study areas. Based on the measurement results obtained with the use of SR4 sensors, hourly traffic intensities were defined for each of those areas. In the first study area, the hourly traffic intensity varied from 30 to 65 vehicles per hour. In the second and third study areas, it varied between 20-30 and 200-300 vehicles per hour, respectively. In the second and third study areas, very low pedestrian traffic (up to 10 persons per hour) was recorded in the vicinity of the traffic circles in question. In the first study area, the measurements were performed in the fall. In the vicinity of the traffic circles (numbers from 1 to 4), pedestrian traffic of 6-10 persons per hour was observed. In the vicinity of the traffic circles located close to the main promenade (numbers from 5 to 7), in turn, the pedestrian traffic volume equaled 8-25 persons per hour.

All results obtained with the use of the sensors were then subjected to statistical analysis. The analysis, relying on the Kolmogorov goodness-of-fit test, has shown that all result populations were characterized by normal distribution.

3. RESEARCH RESULTS

The basic geometric parameters of the traffic circles analyzed (divided based on their locations within the individual study areas) are presented in Table 1. The designations used and the swept paths, based on the representative traffic circles selected from the three different study areas, are shown in Fig. 2. Analysis of the swept paths from the first

numerację w danym obszarze. Na rysunku tym podano również odległości pomiędzy poszczególnymi rondami i skrzyżowaniami.

Drugim założeniem badawczym był wybór i przyjęcie sposobu pomiaru prędkości. W analizie uwzględniono tylko ruch swobodny [22]. Do pomiarów wykorzystano zsynchronizowane czasowo cztery czujniki elektroniczne SR4, mierzące równocześnie natężenie ruchu i prędkość pojazdów w obu kierunkach. Czujniki umieszczono na dojeździe, przed rondem, za rondem i na odjeździe. Aby zapewnić jednorodność danych, czujniki montowano zawsze w jednakowych odległościach od krawędzi zewnętrznej ronda. Dane z pomiarów obejmowały: datę, czas, prędkość, odstęp między pojazdami wyrażony w metrach oraz odstęp pomiędzy pomiarami wyrażony w sekundach, kategorię pojazdów oraz kierunek ruchu. Ponieważ pomiary były wykonywane z dokładnością do 0,1 s, można było wyselekcjonować pojazdy poruszające się w ruchu swobodnym, przyjmując kryterium z [23, 24], że niezakłócona luka czasowa przed pojazdem jest równa co najmniej 7 s. Pomiary wykonywano w dniach roboczych w godzinach od 10 do 16 i kończono je, gdy na ostatnim czujniku było zebrane minimum 100 pomiarów spełniających warunek ruchu swobodnego.

Trzecie założenie badawcze dotyczyło jednorodności godzinowego natężenia ruchu, charakterystycznego w danym obszarze badawczym. Wykorzystując wyniki pomiarów uzyskane z czujników SR4 określono w każdym z tych obszarów godzinowe natężenie ruchu. W pierwszym obszarze badawczym godzinowe natężenie ruchu wahało się w granicach 30-65 P/h, w drugim obszarze 20-30 P/h, a w trzecim 200-300 P/h. W obszarze drugim i trzecim w okolicy badanych rond odnotowano bardzo małe (do 10 Ps/h) natężenie ruchu pieszych. W obszarze pierwszym pomiary wykonano w okresie jesiennym, podczas którego w okolicy rond (ponumerowanych kolejno od 1 do 4) odnotowano natężenie ruchu pieszych w zakresie 6-10 Ps/h, natomiast w pobliżu rond położonych przy głównej promenadzie (oznaczonych numerami od 5 do 7) w granicach 8-25 Ps/h.

Wszystkie odczytane z czujników wyniki poddano następnej analizie statystycznej. Przeprowadzona z wykorzystaniem testu zgodności Kołmogorowa analiza wykazała, że wszystkie populacje wyników miały rozkład normalny.

area shows that in the case of one-way streets, the traffic circles were passed partly through the raised central island, and that the swept paths of the design vehicles depended primarily on the locations of vehicles parked in the larking lanes in the close vicinity to the traffic circles (Fig. 2a). Traffic circles located in the second study area did not occupy the entire surface area of the junction, and the swept paths of the design vehicles coincided, to a small degree, with the surface area of the raised central island (Fig. 2b). Cases were also recorded in which vehicles were passing through the traversable raised central island. In the third study area, in turn, on the traffic circles with a small non-traversable raised central island, the swept paths of design vehicles were located outside the islands (Fig. 2c). Analysis of the highly diverse geometric parameters of the traffic circles and the impact that one- and two-way streets have of the swept paths of design vehicles served as a basis for adopting one more typical parameter that described horizontal deviation of the swept path axis along the circulatory roadway (last column in Table 1).

More detailed considerations concerning the swept paths of design vehicles moving on circulatory roadways around small roundabouts are presented in publication [25], while horizontal traffic calming methods are described in more detail in paper [26].

3. REZULTATY BADAŃ

Podstawowe parametry geometryczne wybranych do analizy rond typu pineska (z podziałem na ich lokalizację w poszczególnych obszarach badawczych) zestawiono w Tabl. 1. Ilustrację przyjętych oznaczeń oraz korytarzy ruchu na przykładzie wybranych, z trzech różnych obszarów badawczych, reprezentatywnych rond przedstawiono na Rys. 2. Analiza korytarzy ruchu w pierwszym obszarze wskazuje, że na ulicach jednokierunkowych przejazd przez rondo odbywał się częściowo na wyniesionej wyspie, a korytarze ruchu pojazdów miarodajnych zależały w głównej mierze od miejsca zaparkowanych samochodów na pasach postojowych, w bliskiej odległości od ronda (Rys. 2a). Usytuowane w drugim obszarze badawczym ronda typu pineska nie zajmowały całej powierzchni skrzyżowania, a korytarze ruchu pojazdów miarodajnych w niewielkiej części zajmowały powierzchnię wyniesionego ronda (Rys. 2b). Odnotowano również przypadki, że samochody poruszały się po przejezdnej wyniesionej wyspie środkowej. Natomiast w trzecim obszarze badawczym na rondach pineska z niewielką wyniesioną nieprzejezdną wyspą środkową korytarze ruchu pojazdów miarodajnych znajdowały się poza wyspą (Rys. 2c).

Analiza bardzo zróżnicowanych parametrów geometrycznych rond oraz uwzględnienie wpływu ulic jednokierunkowych i dwukierunkowych na korytarze ruchu pojazdów miarodajnych stanowiły podstawę do przyjęcia jeszcze jednego charakterystycznego parametru, opisującego odchylenie osi korytarza ruchu na jezdni okrężnej (ostatnia kolumna w Tabl. 1).

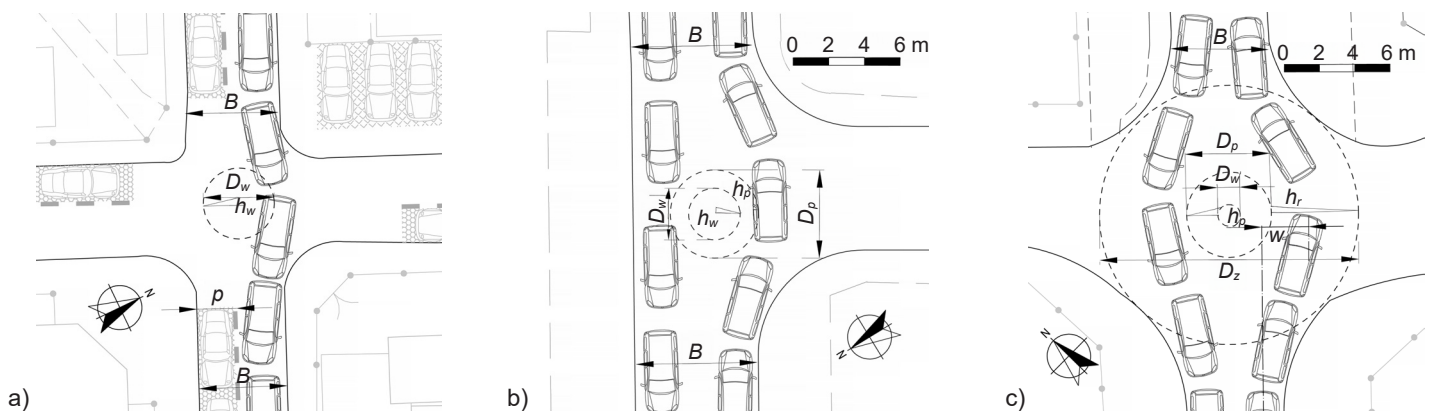


Fig. 2. Image of designations from Table 1 and swept path: a) an example from the first study area, b) an example from the second study area, c) an example from the third study area

Rys. 2. Ilustracja oznaczeń z Tablicy 1 oraz korytarzy ruchu: a) przykład z pierwszego obszaru badawczego, b) przykład z drugiego obszaru badawczego, c) przykład z trzeciego obszaru badawczego

Table 1. Summary of geometric parameters of the traffic circles in individual research area

Tablica 1. Zestawienie parametrów geometrycznych rond typu pineska w poszczególnych obszarach badawczych

NO. Nr	Geometric parameters / Parametry geometryczne									
	D_z	D_p	D_w	h_w	h_p	h_r	B	p	l	w
First study area / Pierwszy obszar badawczy										
1	—*)	—*)	4.0	12.0	—*)	—*)	6.0	2.0	193	1.4
2	—*)	—*)	4.0	9.0	—*)	—*)	6.0	2.0	150	1.4
3	—*)	—*)	4.0	17.0	—*)	—*)	5.0	2.0	125	1.4
4	—*)	—*)	4.0	16.0	—*)	—*)	5.0	2.0	150	1.4
5	—*)	—*)	4.0	12.0	—*)	—*)	5.0	2.0	140	1.4
6	—*)	—*)	4.0	8.0	—*)	—*)	5.0	—*)	135	0.0
7	—*)	—*)	4.0	11.0	—*)	—*)	5.0	2.0	68	1.4
Second study area / Drugi obszar badawczy										
1	—*)	6.0	2.1	5.6/10.6	7.8/5.6	—*)	7.0	−/2.0	75/63	0.8/1.4
2	—*)	6.0	2.1	12.0/11.3	7.9/8.6	—*)	7.0	—*)/—*)	63/63	0.6/1.8
3	—*)	6.9	3.6	12.0/9.8	9.0/10.3	—*)	7.0	2.0/*	63/38	2.5/1.1
4	—*)	5.0	3.0	6.1/3.1	8.8/10.0	—*)	7.0	—*)/—*)	38/44	1.5/0.0
5	—*)	5.0	2.1	11.3/14.5	4.8/4.9	—*)	7.0	2.0/—*)	44/100	1.0/0.7
Third study area / Trzeci obszar badawczy										
1	14.9	5.0	1.2	—*)	10.0/10.4	18.5/11.0	5.50	—*)	—*)/24	2.7/2.5
2	14.9	5.0	1.2	—*)	8.4/16.5	12.1/13.6	5.50	—*)	21/39	1.9/1.9
Designations / Oznaczenia:										
D_z – outer diameter / średnica zewnętrzna [m], D_p – truck apron diameter / średnica pierścienia [m], D_w – inner diameter / średnica wewnętrzna [m], h_w – elevation of central island (west/east direction) / wysokość pochylenia wyspy środkowej (kierunek z zachodu/ze wschodu) [cm], h_p – elevation of truck apron (west/east direction) / wysokość pochylenia pierścienia (kierunek z zachodu/ze wschodu) [cm], h_r – elevation of circulatory roadway (west/east direction) / wysokość pochylenia jezdni ronda (kierunek z zachodu/ze wschodu) [cm], B – width of the carriageway / szerokość jezdni [m], p – width of the parking lane / szerokość pasa postojowego [m], l – length of the access road (west/east direction) / długość dojazdu (kierunek z zachodu/ze wschodu) [m], w – horizontal deviation of the swept path axis of the traffic circle from the original axis before and after the traffic circle (west/east direction) / odchylenie osi korytarza ruchu na rondzie od pierwotnej osi przed i za rondem [m], *) – not applicable / nie dotyczy.										

The main research problem that this project was concerned with consisted in estimating the effectiveness of traffic circles. Figs 3, 4 and 5 present box-and-whisker plots illustrating the distribution of speed of free-flow traffic. The red dotted line shown in all the figures above marks the speed limit in effect in a given study area.

Zagadnienia odchylenia korytarza ruchu pojazdów miarodajnych na jezdni okrężnej wokół małych rond przedstawiono szerzej w publikacji [25], a w odniesieniu do poziomych środków uspokojenia ruchu w publikacji [26].

Głównym problemem badawczym niniejszej pracy było oszacowanie skuteczności funkcjonowania rond typu pineska. Na Rys. 3, 4 i 5 przedstawiono wykresy pudełkowe typu „ramka-wąsy”, ilustrujące oszacowanie przedziałowe prędkości w ruchu swobodnym. Na wszystkich ww. rysunkach linią czerwoną przerywaną zaznaczono dopuszczalną prędkość w danym obszarze badawczym.

Table 2 shows the results of speed measurements and confirmations of the existence of additional factors determining the speed values. Such factors (in addition to the geometric parameters of traffic circles) may also contribute to reducing the speed of vehicles. The aforementioned determinants were defined primarily based on *in situ* observations conducted directly during field measurements. Table 2 presents the speed reduction determinants identified in the course of the studies, and specifies whether their existence has been confirmed “+” or denied “–”, in accordance with the following logic tautology principles:

- A – function of the street: “+” main promenade or shopping street, “–” street used by traffic or street without retail facilities,
- B – function of the corners after the traffic circle: “+” home driveways, entrances to various facilities, traffic calming measures, “–” empty areas (without driveways and entrances) or without additional traffic calming measures, or without any street furniture,
- C – parking lane on the approach: “+” yes, “–” no,
- D – distance between the beginning or end of the parking lane and the edge of the junction: “+” up to 10 m, “–” more than 10 m,
- E – entrance to a calmed traffic zone or beginning of a street: “+” yes, “–” no,
- F – exit from a calmed traffic zone or end of a street: “+” yes, “–” no,
- G – horizontal deviation of the swept path axis: “+” by more than 1 m, “–” otherwise.

Analysis of the data shown both in Figs 3-5 and in Table 2 indicates that the average speed v_{sr} in all of the study areas was, primarily, lower than the permissible value, while the 85% quantile of the speed (v_{85}) exceeded that value at certain locations. So, one may state with a high degree of probability that the use of traffic circles has largely contributed to reducing the speed of vehicles traveling on the streets in question.

The additional factors that may have potentially contributed to reducing speed (by constructing traffic circles in the first and third study areas) included: their external diameter and the horizontal inclination of the circulatory roadway.

W Tabl. 2 zestawiono wyniki pomiarów prędkości oraz potwierdzenia występowania dodatkowych determinant wpływających na jej wartości. Zaliczono do nich czynniki, które poza parametrami geometrycznych rond mogą także przyczyniać się do redukcji prędkości. Powyższe determinanty definiowano głównie na podstawie obserwacji *in situ* przeprowadzanych bezpośrednio podczas pomiarów w terenie badań. W Tabl. 2 przedstawiono determinanty redukcji prędkości ustalone w trakcie badań oraz przypisano im odpowiednie oznaczenia: potwierdzenie („+”) lub zaprzeczenie („–”), zgodnie z zasadami logiki dwuwartościowej.

- A – funkcja ulicy: „+” główny deptak lub ulica handlowa, „–” ulica komunikacyjna lub ulica bez obiektów handlowych,
- B – typ zagospodarowania narożników za rondem: „+” zjazdy do posesji, wejścia do różnych obiektów lub zastosowane środki uspokojenia ruchu, „–” teren pusty (bez zjazdów i wejść do obiektów) lub bez dodatkowych środków uspokojenia ruchu, albo bez elementów małej architektury,
- C – pas postojowy na pasie dojazdu: „+” tak, „–” nie,
- D – odległość początku lub końca pasa postojowego od krawędzi skrzyżowania: „+” do 10 m, „–” więcej niż 10 m,
- E – wjazd do strefy ruchu uspokojonego lub początek ulicy: „+” tak, „–” nie,
- F – wyjazd ze strefy ruchu uspokojonego lub koniec ulicy: „+” tak, „–” nie,
- G – odchylenie osi korytarza ruchu: „+” o więcej niż 1 m, „–” w przeciwnym przypadku.

Analiza danych przedstawionych zarówno na Rys. 3-5, jak i w Tabl. 2 wykazała, że średnia prędkość v_{sr} we wszystkich obszarach badawczych była w większości poniżej limitowanej wartości, natomiast kwantyl 85% prędkości v_{85} w niektórych miejscach przekraczał tą wartość. Można z wysokim prawdopodobieństwem stwierdzić, że zastosowanie rond typu pineska przyczyniło się w dużej mierze do redukcji prędkości na analizowanych ulicach.

Do ewentualnych dodatkowych czynników, które w dużej mierze mogły się przyczynić do redukcji prędkości w wyniku zastosowania rond typu pineska w pierwszym i trzecim obszarze badawczym można zaliczyć także ich średnicę zewnętrzną oraz pochylenie poprzeczne jezdni okrężnej.

In the second study area, vehicles traveling straight were passing through the traffic circles using also, partly, the roadway located outside the traffic circle (Fig. 2b – attached to Table 1). The parameters of traffic circles located in this area did not result in a considerable reduction of the vehicles' speed, but most likely contributed to the fact that the permissible speed limits were observed.

W drugim obszarze badawczym samochody jadące na wprost przejeżdżały przez ronda typu pineska korzystając częściowo także z jezdni usytuowanej poza rondem (Rys. 2b – dołączony do Tabl. 1). Parametry rond pineska znajdujących się w tym obszarze nie wpływały zatem istotnie na redukcję prędkości pojazdów, jednak prawdopodobnie przyczyniały się do utrzymania dopuszczalnej prędkości.

Table 2. Summary of research results and determinants further contributing to speed in specific study areas

Tablica 2. Zestawienie wyników badań oraz dodatkowych determinant przyczyniających się do redukcji prędkości w poszczególnych obszarach badawczych

No. Nr	v_{85}	v_{85}	Δv_{85}	$v_{av} / v_{\dot{s}r}$	$v_{av} / v_{\dot{s}r}$	$v_{av} / v_{\dot{s}r}$	Determinants / Determinanty:						
	<i>before / przed</i>	<i>after / za</i>		<i>before / przed</i>	<i>after / za</i>		A	B	C	D	E	F	G
First study area / Pierwszy obszar badawczy													
1	22.7	22.1	2.6	20.1	20.5	3.7	–	–	+	+	+	–	+
2	19.7	18.7	1.0	17.7	16.2	1.4	–	–	+	+	–	–	+
3	19.1	13.1	5.8	16.8	11.7	5.1	–	–	+	+	+	–	+
4	21.3	15.1	6.2	17.5	12.9	4.6	–	+	+	+	–	+	+
5	22.3	18.3	4.0	18.7	16.6	2.2	+	+	+	+	–	–	+
6	23.7	23.0	0.7	19.8	19.1	0.7	+	–	*	*	–	–	–
7	18.5	14.2	4.3	16.2	11.8	4.4	+	+	+	+	+	–	+
Second study area – the direction of traffic from east to west / Drugi obszar badawczy – kierunek ruchu ze wschodu na zachód													
1	19.6	18.4	1.2	14.8	13.9	0.9	–	–	*	*	+	–	–
2	23.0	26.0	–3.0	17.4	19.4	–2.1	–	–	*	*	–	–	+
3	24.0	23.0	1.0	14.1	18.1	–1.0	–	–	+	–	–	–	+
4	21.6	21.2	0.4	17.0	16.7	0.4	–	–	*	*	–	–	–
5	20.9	21.4	–0.5	16.5	16.9	–0.4	–	–	+	–	–	+	–
Second study area – the direction of traffic from west to east / Drugi obszar badawczy – kierunek ruchu z zachodu na wschód													
5	18.7	17.6	1.1	14.9	14.0	0.9	–	–	*	*	+	–	–
4	19.8	19.4	0.4	15.8	15.4	0.4	–	–	*	*	–	–	+
3	22.0	24.0	–2.0	17.5	18.4	–0.9	–	–	*	*	–	–	+
2	24.0	24.0	0.0	19.3	18.3	1.0	–	–	*	*	–	–	+
1	22.3	21.6	0.7	17.0	16.5	0.5	–	–	+	+	–	+	–
Third study area – the direction of traffic from east to west / Trzeci obszar badawczy – kierunek ruchu ze wschodu na zachód													
1	26.0	24.0	2.0	22.5	19.7	2.8	–	+	*	*	+	–	+
2	26.0	24.0	2.0	21.2	20.2	1.0	–	+	*	*	–	–	+
Third study area – the direction of traffic from west to east / Trzeci obszar badawczy – kierunek ruchu z zachodu na wschód													
2	29.2	28.0	1.2	24.0	23.6	0.3	–	+	*	*	–	–	+
1	26.0	30.0	–4.0	21.9	25.9	–4.0	–	–	*	*	–	+	+

Designations / Oznaczenia:

“+” – confirmation of logical tautology / potwierdzenie tautologii logicznej,

“–” – no confirmation of logical tautology / brak potwierdzenia tautologii logicznej,

“*” – no parking lanes on main approach / brak pasów postojowych na wlotach głównych.

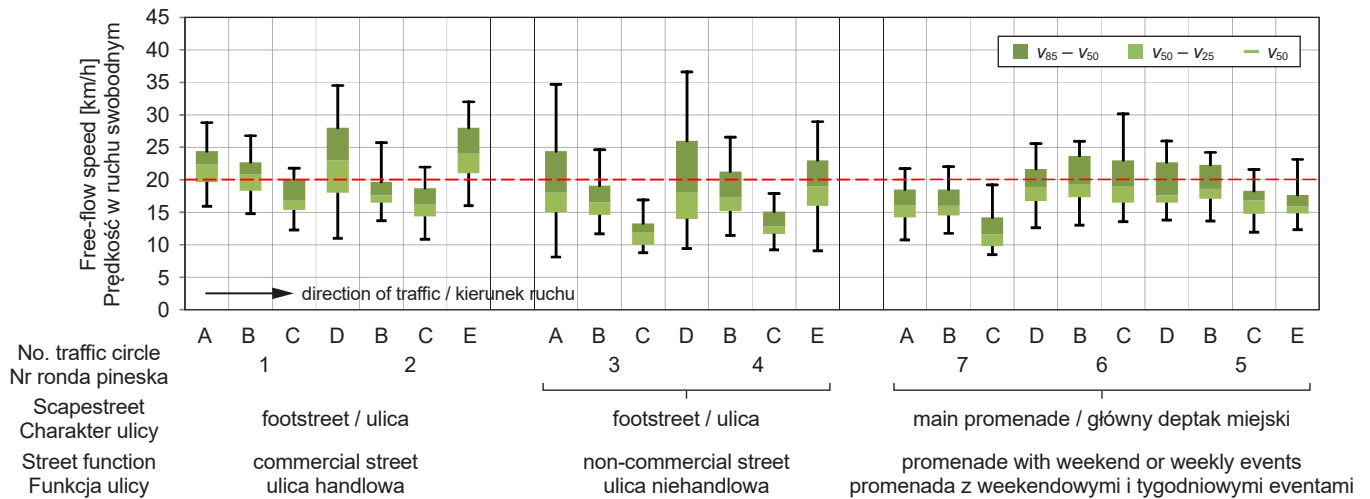


Fig. 3. Distribution of the free-flow speed on box-and-whisker plot for the first study area (along the direction of traffic on one-way streets); designations: A – entrance to a zone or beginning of a street, B – before, C – after, D – between, E – exit the zone or end of the street.
Rys. 3. Oszacowanie na wykresie „ramka-wąsy” prędkości w ruchu swobodnym w pierwszym obszarze badawczym (wzdłuż kierunku ruchu na ulicach jednokierunkowych); oznaczenia: A – wjazd do strefy lub początek ulicy, B – przed, C – za, D – pomiędzy, E – wyjazd ze strefy lub koniec ulicy.

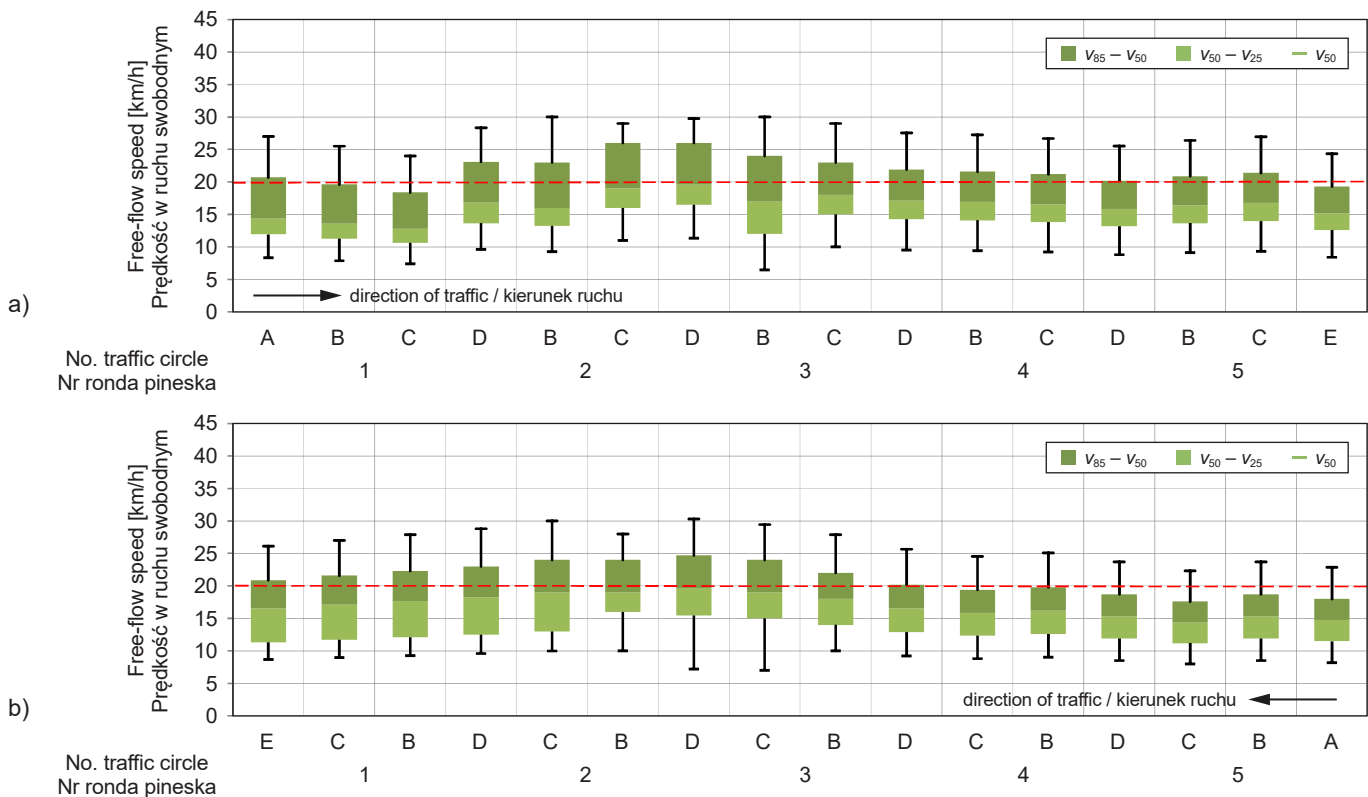


Fig. 4. Distribution of the free-flow speed on box-and-whisker plot for the second study area: a) east-west direction, b) west-east direction; designations: as in Fig. 3

Rys. 4. Oszacowanie na wykresie „ramka-wąsy” prędkości w ruchu swobodnym w drugim obszarze badawczym: a) w kierunku wschód-zachód, b) w kierunku zachód-wschód; oznaczenia: jak na Rys. 3.

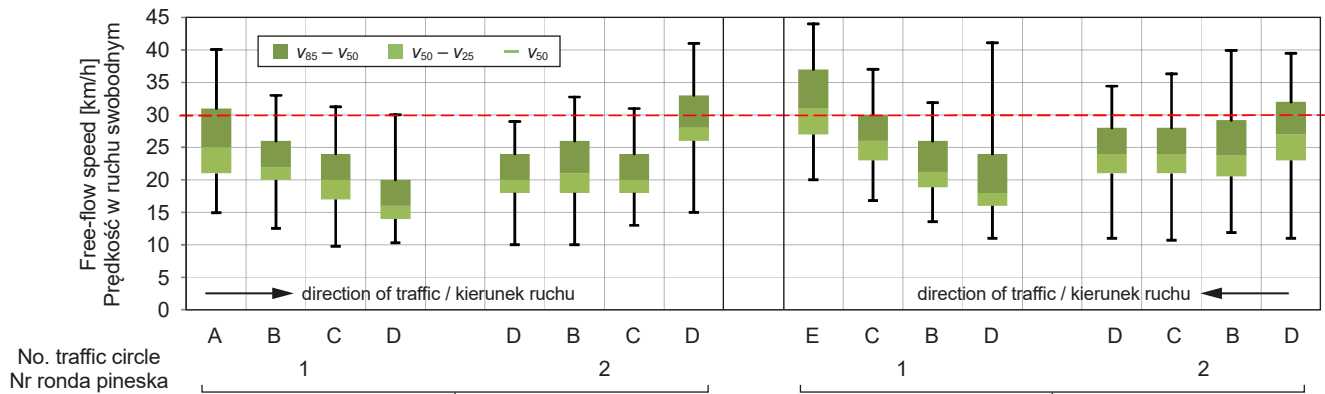


Fig. 5. Distribution of the free-flow speed on box-and-whisker plot for the third study area; designations: as in Fig. 3

Rys. 5. Oszacowanie prędkości w ruchu swobodnym na wykresie „ramka-wąsy” w trzecim obszarze badawczym; oznaczenia: jak na Rys. 3.

Additionally, other determinants identified while conducting the measurements could have also impacted speeds reached after the traffic circles. In the first study area, these could have included, inter alia, such factors as: function of the street and street landscaping in the vicinity of the junction. For example, on the main promenade, where numerous commercial, service and food establishments generated high pedestrian traffic, the vehicle speeds and their reduction at traffic circles were much lower than on other streets used for traffic-related purposes only. Parking lanes could be another factor that significantly contributed to reducing speed. Depending on their location and positioning close to the edge of the traffic circle, they could have considerably contributed to reducing speed, as vehicles in the parking lanes significantly reduced the drivers' field of view and forced them to follow specific curved paths when navigating the traffic circles, with those paths depending, additionally, on the height of the central island. The remaining determinants contributing to speed reduction on traffic circles could have been related to their location within the specific study areas. These include the following: position of the traffic circle on an entrance to, exit from or in the middle of such a zone.

4. DISCUSSION

Various statistical analysis approaches have been relied upon to evaluate the measurement results obtained. First of all, the impact of the height of the raised central island (its elevation over the plane of the circulatory roadway) on speed reduction was analyzed. Then, the dependency of the reduction in speed on the distance l from the previous junction, covered on the approach to the traffic circle, was investigated. Then, the dependency of the speed before

Dodatkowo wpływ na prędkości za rondem mogły mieć inne determinanty zdefiniowane podczas wykonywania pomiarów. W pierwszym obszarze badawczym mogły to być m.in. takie czynniki jak: funkcja ulicy oraz zagospodarowanie terenu w rejonie skrzyżowania. Na przykład na głównej promenadzie, przy której znajdowały się liczne obiekty handlowe, usługowe oraz gastronomiczne generujące duży ruch pieszych, osiągane prędkości oraz ich redukcja na rondach typu pineska były znacznie mniejsze niż na pozostałych ulicach, pełniących jedynie funkcję komunikacyjną. Kolejną determinantą, znacząco wpływającą na obniżenie prędkości mogły być pasy postojowe. W zależności od ich lokalizacji i bliskiej odległości od krawędzi ronda istotnie mogły one wpływać na redukcję prędkości, gdyż zaparkowane na pasach postojowych samochody istotnie ograniczały kierowcom optyczne widzenie jezdni i wymuszały konkretny ruch krzywoliniowy wokół ronda, zależny dodatkowo od wysokości wyniesienia wyspy środkowej. Pozostałe determinanty wpływające na zmniejszenie prędkości na rondach mogły być związane z ich lokalizacją w poszczególnych obszarach badawczych. Do nich można zaliczyć: usytuowanie rond na wjeździe, wyjeździe, czy też położenie w części środkowej takiej strefy.

4. DYSKUSJA

Do oceny uzyskanych wyników pomiarów zastosowano różne analizy statystyczne. W pierwszej kolejności przeanalizowano wpływ różnicy wysokości wyspy centralnej względem płaszczyzny przyległej jezdni okrężnej na redukcję prędkości. W drugiej kolejności zbadano zależność redukcji prędkości od długości dojazdu l do ronda pineska, licząc od poprzedniego skrzyżowania. Następnie

the traffic circle v_{before} on the distance covered on the approach and the dependency of the speed after the traffic circle v_{after} on the height of the raised part of the traffic circle h_r were determined. The Pearson's correlation coefficients are presented in Table 3, separately for each of the three study areas, and also jointly, for all of them together. In the list of correlation coefficients characteristic of the second study area, an additional distinction is made based on: direction of traffic, location of parking lanes, sporadically parked vehicles in the parking lanes, or the absence of such parking lanes (cases 2a and 2b in Table 3, respectively).

Table 3. List of correlation Pearson coefficients between analysed variables

Tablica 3. Zestawienie współczynników korelacji Pearson'a pomiędzy analizowanymi zmiennymi

Study areas / Obszary badawcze							
1	2a	2b	3	1	2a	2b	3
v_{85}				$v_{av} / v_{\dot{s}r}$			
$R \rightarrow \Delta v_{85} = f(h_r)$				$R \rightarrow \Delta v_{av} = f(h_r)$ $R \rightarrow \Delta v_{\dot{s}r} = f(h_r)$			
0.92	-0.30	-0.44	0.05	0.84	-0.35	-0.71	-0.04
0.34				0.28			
$R \rightarrow \Delta v_{85} = f(l)$				$R \rightarrow \Delta v_{av} = f(l)$ $R \rightarrow \Delta v_{\dot{s}r} = f(l)$			
-0.25	0.08	0.71	0.41	-0.21	-0.08	0.69	0.66
0.54				0.63			
$R \rightarrow v_{85\ before} = f(l)$ $R \rightarrow v_{85\ przed} = f(l)$				$R \rightarrow v_{av\ before} = f(l)$ $R \rightarrow v_{\dot{s}r\ przed} = f(l)$			
0.62	-0.03	-0.42	-0.25	0.74	-0.54	-0.42	0.14
-0.15				-0.12			
$R \rightarrow v_{85\ after} = f(h_r)$ $R \rightarrow v_{85\ za} = f(h_r)$				$R \rightarrow v_{av\ after} = f(\Delta h_r)$ $R \rightarrow v_{\dot{s}r\ za} = f(h_r)$			
-0.70	0.12	0.21	0.10	-0.60	-0.71	0.23	0.05
-0.21				-0.12			
Designations / Oznaczenia:							
2a – direction of movement from east to west / kierunek ruchu ze wschodu na zachód,							
2b – direction of movement from west to east / kierunek ruchu z zachodu na wschód.							

przeanalizowano zależność prędkości przed rondem v_{przed} od długości dojazdu l do niego oraz zależność prędkości za rondem v_{za} od wysokości wyniesionej części ronda h_r . Wyniki obliczonych współczynników korelacji Pearson'a przedstawiono w Tabl. 3, przy czym ich wartości przedstawiono zarówno oddzielnie dla każdego z trzech obszarów badawczych, jak też w odniesieniu do wszystkich łącznie biorąc. W zestawieniu współczynników charakterystycznych dla drugiego obszaru badawczego wprowadzono dodatkowo ich rozróżnienie z uwagi na: kierunek ruchu, usytuowanie pasów postojowych, sporadycznie zaparkowane na nich pojedyncze samochody lub brak pasów postojowych (odpowiednio przypadki 2a i 2b w Tabl. 3).

Analiza zestawionych w Tabl. 3 współczynników korelacji wykazała ich niejednoznaczność. Szczegółowa ocena potwierdziła, że oprócz wysokości wyniesionej części ronda h_r na redukcję prędkości Δv_{85} i Δv_{sr} oraz na prędkość za rondem dodatkowy wpływ mogą mieć także inne determinanty. Natomiast, jeśli chodzi o długość dojazdu do ronda l , to ma ona zróżnicowany wpływ zarówno na redukcję prędkości Δv_{85} oraz Δv_{sr} jak i na prędkość przed rondem. W obu rozpatrywanych przypadkach zarówno wysokość części ronda h_r , jak i długość dojazdu do ronda l miały, więc trudny do jednoznacznego ustalenia wpływ na analizowane parametry prędkości (v_{85} , v_{sr} , Δv_{85} i Δv_{sr}) w poszczególnych obszarach badawczych, co sugerowało konieczność, uwzględnienia również innych determinant. Z powyższej analizy wynika, że ustalenie wpływu stosowania rond typu pineska na prędkość lub jej redukcję jest, zatem dość złożone a wnioski zróżnicowane. Biorąc powyższe pod uwagę podczas pomiarów prędkości przed i za rondem uwzględniono, więc dodatkowo wpływ tzw. determinant niemierzalnych na uzyskane wyniki, a rezultaty przeprowadzonych analiz logicznych przedstawiono w formie tabelarycznego zestawienia w Tablicy 4. Podobne metody ustalania i interpretacji wpływu determinant z wykorzystaniem m.in. analiz logicznych zastosowano w publikacjach [27-28].

Do oceny skuteczności rond typu pineska w uspokojeniu ruchu przyjęto zasadę logiczną opartą na systemie zero-jedynkowym. Zgodnie z nią, jeśli dana determinanta została odnotowana in situ, przypisywano jej wartość „1”, w przeciwnym przypadku wartość „0”. Natomiast w przypadku braku na ulicy pasów postojowych zastosowano oznaczenie „*” (Tabl. 4). W celu lepszego zobrazowania

Analysis of the correlation coefficients shown in Table 3 has revealed that they are inconclusive. A detailed assessment has confirmed that in addition to the height of the raised portion of the traffic circle h_r , speed reduction Δv_{85} , Δv_{av} and speed after the traffic circle may be also additionally impacted by other determinants. However, as far as the length of the approach to the traffic circle is concerned, its impact on the reduction of speed Δv_{85} , Δv_{av} and on the speed after the traffic circle varies. In both cases under consideration, the impact of both the height of the raised part of the traffic circle h_r and the length of the approach on the speed-related parameters analyzed (v_{85} , v_{av} , Δv_{85} and Δv_{av}) could not be clearly determined in the individual study areas, which suggested that other determinants had to be taken into consideration as well. The aforementioned analysis shows that the process of determining the impact that traffic circles have on speed or on its reduction is rather complex, and that the conclusions drawn may vary. With the above taken into consideration, the impact of additional, non-measurable determinants was also accounted for while measuring the speed of vehicles before and after the traffic circles, and the results of the logical analysis processes are presented in the table in Table 4. Similar methods relied upon to determine and interpret the impact of various determinants, *inter alia* through the use of logical analysis, were presented by the authors of [27-28].

In order to evaluate the effectiveness of traffic circles in calming traffic, a logical principle based on a binary system has been adopted. In accordance with the said principle, of a given determinant was identified *in situ*, it was assigned a “1” value. Otherwise, a “0” value was assigned thereto. In cases in which no parking lanes were present on a given street, the “*” symbol was used (Table 4). In order to present the determinant analysis conducted in a clearer manner, a chromatic scale was used in Table 4, with its values linked to the values of the correlation coefficients R and the sum of the confirmed determinants that depend on the number of traffic circles n analyzed within a given study area. With the research results published in [25] taken into consideration, it was assumed that the horizontal deviation of the swept path axis “w” by more than 1 meter may additionally impact the reduction in speed, and this particular determinant was assigned the “1” value (Table 4).

przeprowadzonej analizy determinant w Tabl. 4 zastosowano skalę chromatyczną, a jej wartości ściśle powiązano z wynikami współczynników korelacji R oraz z sumą potwierdzonych determinant, zależnych od liczby analizowanych rond n w danym obszarze badawczym. Uwzględniając wyniki badań opublikowane w [25], przyjęto założenie, że odchylenie osi korytarza ruchu “w” o więcej niż 1 m może wpływać dodatkowo na redukcję prędkości i determinantie tej przypisano wartość „1” (Tabl. 4).

W Tabl. 4, po lewej stronie przedstawiono współczynniki korelacji w odniesieniu do wybranych funkcji zależnościowych pomiędzy parametrem prędkości a wysokością wyspy ronda h_r oraz długością dojazdu do ronda l . Natomiast po prawej stronie Tabl. 4 zamieszczono potwierdzenia występowania (1) lub zaprzeczenia (0) wszystkich rozważanych determinant. W każdym obszarze badawczym podano sumę potwierdzonych determinant Σ , w celu porównania tych wyników odpowiednio z wartościami współczynników korelacji. W pierwszym obszarze badawczym porównanie wartości współczynników korelacji i sumy determinant wskazuje, że najistotniejsze były determinanty C, D i G związane z pasem postojowym. Mniejszy wpływ na prędkość pojazdów lub jej redukcję miały determinanty dotyczące funkcji ulicy i zagospodarowania otoczenia danego skrzyżowania. Najmniejsze znaczenie miała lokalizacja ronda na końcu analizowanej ulicy. Natomiast w drugim i trzecim obszarze badawczym dodatkowy wpływ na parametry prędkości miały odchylenie osi korytarza ruchu oraz zagospodarowanie otoczenia skrzyżowania. Jednak wpływ tych czynników był bardzo zróżnicowany.

Analiza danych przedstawionych w Tabl. 4 wykazała, że stosowanie rond typu pineska w uspokojeniu ruchu jest korzystne i przyczynia się do redukcji prędkości. W strefach zamieszkania ronda te przyczyniają się do redukcji prędkości zarówno na ulicach jednokierunkowych, jak i dwukierunkowych. Aby tak jednak było, ich średnica zewnętrzna D_z powinna być równa lub większa od szerokość jezdni na wlotach głównych B . Wówczas wyniesiona powierzchnia ronda wymusza odchylenie osi korytarza ruchu w stosunku do przejazdu wzdłuż w linii prostej i skutecznie oddziałuje na redukcję prędkości. Na Rys. 2 przedstawiono korytarze ruchu pojazdów na rondach z różnymi wartościami średnicy zewnętrznej.

of Table 4, confirmations of existence (+) or non-existence (–) of all the determinants considered are presented. For each of the study areas, the sum of confirmed determinants Σ is given in order to compare the results with suitable correlation coefficient values. In the first study area, comparison of the correlation coefficient values and the sum of the determinants shows that C, D and G determinants (related to the parking lane) were of the greatest importance. The speed of vehicles or its reduction were impacted, to a lesser degree, by determinants related to the function and landscaping of the street, as well as the surroundings of a given junction. The lowest impact was exerted by the location of a traffic circle at the end of the street studied. In the second and third study areas, in turn, speed-related parameters were additionally impacted by the horizontal deviation of the swept path axis, street landscaping and the surroundings of the junction. However, the impact of those factors varied significantly.

Analysis of the data presented in Table 4 has shown that the use of traffic circles in order to calm traffic is beneficial and contributes to reducing vehicle speeds. When used in home zones, traffic circles foster the reduction of speed both on one- and two-way streets. However, in order to serve their purpose, the outer diameter D_z of such circles should be equal to or larger than the width of the main approach B carriageway. In such a scenario, the raised surface of the circle forces a horizontal deviation of the swept path (compared to a straight-line passage) and contributes to reducing speed. Swept paths of vehicles passing through traffic circles with various outer diameter values are shown in Fig. 2.

In line with the suggestions presented in publications [1-6, 8], traffic circles may additionally feature a traversable, raised central island that is made of stone blocks. The switch to concrete block pavement on the central island additionally impacts the behaviors of passenger cars, resulting in a horizontal deviation of their swept path when passing through the roundabout [1-6]. The height h_w of the central island should be greater than that of the circulatory roadway h_r . According to the research and analyses conducted by the author, the diameter D_w of the central island and its height h_w should allow design vehicles to turn freely and should result in a horizontal deviation of the swept paths of passenger cars by more than 1 m compared to a straight-line path.

na zachowania kierowców samochodów osobowych, powodując odchylenie osi korytarza ruchu przy przejeździe przez rondo [1-6]. Wyniesienie wyspy środkowej h_w powinno być większe niż zastosowane na jezdni okrężnej h_r . Na podstawie wykonanych przez autora badań i analiz, średnica wyspy środkowej D_w oraz jej wysokość h_w powinny umożliwiać relacje skrętne pojazdów miarodajnych oraz powodować odchylenie osi korytarza ruchu samochodów osobowych o więcej niż 1 m w stosunku do kierunku jazdy wzdłuż linii prostej. Analiza wytypowanych determinant wskazuje, że stosowanie na skrzyżowaniach innych środków uspokojenia ruchu i elementów małej architektury, a także pasów postojowych naprzemiennych, znajdujących się blisko skrzyżowań dodatkowo może przyczynić się do zmniejszenia prędkości pojazdów pomiędzy skrzyżowaniami. Z obserwacji poczynionych w trakcie wykonywania pomiarów wynikało, że jeśli na pasach postojowych nie było zaparkowanych samochodów, to kierowcy wykorzystywali je do przejazdu z większymi prędkościami. W celu uniknięcia takich przypadków wskazane jest zastosowanie na początku oraz końcu pasa postojowego, a także przy dłuższych pasach w środku, elementów małej architektury w postaci wysepek z zielenią lub gazonami betonowymi. Wymaga się, aby takie elementy były oznakowane odpowiednio znakami drogowymi (U-6 i C-10) [13-14]. Na podstawie wykonanych analiz można stwierdzić, że na wjazdach i wyjazdach ze strefy uspokojenia ruchu, gdy pozwalają na to warunki terenowe powinno się stosować na rondach typu pineska wyspy nieprzejezdne, przy zapewnieniu równocześnie przejezdności pojazdu miarodajnego na danym obszarze. Należy wówczas projektować większe średnice zewnętrzne D_z i wewnętrzne D_w , zależnie od istniejących parametrów geometrycznych wlotów z danej ulicy. Średnica zewnętrzna takiego ronda powinna być co najmniej styczna do narożnych krawężników, natomiast średnica wyspy środkowej powinna zapewniać korytarz ruchu pojazdu miarodajnego (Rys. 2c). Zgodnie z [26] parametry geometryczne ronda pineska powinny powodować odchylenie osi korytarza ruchu samochodu o więcej niż 2 m. W tym kontekście wskazane jest także stosowanie dodatkowych środków uspokojenia ruchu powodujących efekt zwężenia optycznego wlotów na ronda lub elementów małej architektury, zastosowanych na narożnikach skrzyżowań.

Evaluation of the selected determinants shows that the use, at junctions, of other traffic calming measures, street furniture and alternating parking lanes located in close proximity may additionally contribute to reducing the speeds that vehicles reach between junctions. The observations performed in the course of the measurements showed that if there were no cars parked in the parking lanes, drivers were using them to pass the traffic circles with higher speeds. In order to avoid such situations, it is recommended that street furniture in the form of islands with green areas or concrete flower pots be positioned at the end of the parking lane or, if the lane is longer, in the middle of it. Such elements need to be properly marked with road signs (U-6 and C-10) [13-14].

Following the evaluations performed, one may state that non-traversable islands should be used at traffic circles, at entrances to and exits from calmed traffic zones, terrain permitting. Simultaneously, passage of design vehicles through that area should be ensured as well. Therefore, larger outer D_z and inner D_w diameters should be designed, depending on the geometric parameters of the approaches from a given street. The outer surface of such a traffic circle should be at least tangential to the corner curbs, while the diameter of the central island should be sufficient to accommodate a swept path of a design vehicle (Fig. 2c). Pursuant to [26], the geometric parameters of traffic circles should force the swept path axis of a passenger car to be horizontally deviated by more than 2 meters. In this context, it is recommended that additional traffic calming measures be deployed, resulting in optical narrowing of the approaches. Furthermore, street furniture should be also positioned on the corners of the junctions.

5. CONCLUSIONS

The following conclusions have been drawn after analyzing the results of the research performed:

1. The use of traffic circles in traffic calming zones is an effective means of reducing speed of vehicles and forcing them to maintain such a lower rate of speed between junctions, as the parameters of the circles force the vehicles to take a circular path around the central island and result in a horizontal deviation of the swept path of a passenger car (relative to a straight line) that exceeds 2 meters.

5. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników uzyskanych z przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Zastosowanie w strefach uspokojenia ruchu rond typu pineska jest skuteczną metodą redukcji prędkości i utrzymywania jej pomiędzy skrzyżowaniami, gdyż parametry rond wymuszają okrężny ruch wokół wyspy i powodują odchylenie osi korytarza ruchu samochodu osobowego od kierunku prostego większe niż 2 m.
2. Za efektywność uzyskania redukcji prędkości odpowiadają przede wszystkim średnice rond D_z i D_w oraz wysokości ich wyniesienia h_w i h_r . Średnica zewnętrzna D_z ronda typu pineska powinna być dobrana tak, aby w miarę możliwości obejmowała prawie cały obszar skrzyżowania, a średnica wewnętrzna D_w przyczyniała się do istotnego odchylenia osi korytarza ruchu samochodu osobowego od kierunku prostego, co w konsekwencji wymusza redukcję prędkości.
3. Dużą skuteczność w uspokojeniu ruchu uzyskuje się dzięki zastosowaniu kilku czynników wpływających łącznie z parametrami geometrycznymi ronda pineska na redukcję prędkości. Wraz z tymi rondami powinny być więc stosowane:
 - wyniesione wyspy środkowe z nawierzchnią zniechęcającą kierowców do jazdy po niej, wymuszające ruch opływowy po otaczającej ją jezdni,
 - pasy postojowe zlokalizowane na wlotach głównych na rondo pineska, rozpoczynające się lub kończące stosunkowo blisko przedłużonej krawędzi jezdni wlotu bocznego,
 - boczne wyspy nieprzejezdne na początku i na końcu pasów postojowych, wymuszające w przypadku braku zaparkowanych pojazdów jazdę równoległą do pasa postojowego oraz krzywoliniowy wjazd na rondo typu pineska i zjazd z niego,
 - przesunięcia wlotów bocznych na rondo typu pineska,
 - w narożnikach skrzyżowania z ruchem okrężnym elementów małej architektury, typu np. stojaki na rowery.
4. W przypadku projektowania strefy ruchu uspokojonego na dużym obszarze lub części osiedla, należy precyzyjnie określić główne wjazdy do strefy i w tych miejscach, jeśli na to pozwalają uwarunkowania lokalne stosować ronda typu pineska z nieprzejezdną wyspą

2. It is mainly up to diameters D_z and D_w of the traffic circles and their elevations h_w and h_r whether the speed of vehicles will be reduced effectively. The outer diameter D_z of traffic circles should be selected to ensure that it covers, to the extent possible, almost the entire surface area of the junction, and internal diameter D_w should contribute to a considerable horizontal deviation of the axis of the swept path of a passenger car, relative to a straight line, therefore forcing that its speed be reduced.
3. Traffic may be calmed very effectively by deploying several measures that result, in combination with the geometrical parameters of traffic circles, in reduced speed rates. To summarize, the following should be used in combination with traffic circles:
 - raised central islands whose pavement should discourage drivers from traversing them, forcing vehicles to use the circulatory roadway around it,
 - parking lanes located on the main approaches to the traffic circle, beginning or ending relatively close to the extended edge of the lateral approach roadway,
 - non-traversable side islands located at the beginning and the end of parking lanes, forcing drivers – if no parked vehicles are present – to travel in parallel to the parking lane as well as to enter and leave the traffic circle by taking a curved line,
 - shifted lateral approaches to traffic circles,
 - street furniture (e.g. bicycle stands) located on the corners of junctions with roundabouts.
4. When designing a calmed traffic zone that is to cover a significant area or a large part of a housing estate, the main entrances to such a zone must be identified precisely and, local conditions permitting, traffic circles with a non-traversable central island should be positioned there, thus creating a corridor that may be used by municipal vehicles.
5. Work is currently under way to develop traffic calming guidelines which should contain design recommendations applicable to traffic circles. They should also determine, in a precise manner, their geometric parameters and additional determinants that contribute to achieving the expected traffic calming outcomes.

środkową, zapewniając w ten sposób korytarz ruchu pojazdu służb komunalnych.

5. Aktualnie trwają prace nad opracowywaniem wytycznych dotyczących uspokojenia ruchu, które powinny zawierać odpowiednie zalecenia projektowe odnośnie stosowania rond pineska, a także precyzyjnego określenia ich parametrów geometrycznych oraz dodatkowych determinant przyczyniających się do uzyskania oczekiwanego efektu uspokojenia ruchu.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Roads development guide. East Ayrshire, Strathclyde Regional Council: London, UK, 2010
- [2] Traffic calming guidelines. Devon County Council Engineering & Planning Department: Devon, UK, 1992
- [3] IPOD – Richtlijnen openbaar domein. Stad Gent, Berchem-Antwerpen, Netherlands, 2011
- [4] Urban Traffic Areas – Part 7 – Speed Reducers. Vejdirektoratet-Vejregeludvalget, Copenhagen, Denmark, 1991
- [5] Directives for the design of urban roads: RAS 06. Road and Transportation Research Association, Working Group Highway Design, FGSV, Köln, Germany, 2006
- [6] *Hummel T., Mackie A., Wells P.*: Traffic calming measures in built-up areas. Literature Review. PR/SE/622/02. Swedish National Road Administration, Borlänge, Sweden, 2002
- [7] Wytyczne zarządzania prędkościami na drogach samorządowych, cz. II, pod redakcją S. Gacy, Politechnika Krakowska, Politechnika Gdańska, Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej, Kraków/Gdańsk, październik 2016
- [8] Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych WPSD, cz. I. GDDP, Warszawa, 2001
- [9] *Barbosa H.M.*: Impacts of traffic calming measures on speeds on urban roads. University of Leeds, Leeds, UK, 1995
- [10] *Jamrozik K., Bohatkiewicz J.*: Kompleksowe wdrażanie uspokojenia ruchu na przykładzie projektu „Miasteczko Holenderskie” w Puławach. Międzynarodowe Seminarium BRD GAMBIT 2010 „Bezpieczeństwo ruchu drogowego w Polsce u progu nowej polityki transportowej Unii Europejskiej”, Politechnika Gdańska, 22-23 kwietnia 2010
- [11] *Bohatkiewicz J., Jamrozik K., Nowak P.*: „Miasteczko Holenderskie” – kompleksowe uspokojenie ruchu. Magazyn Autostrady, 12, 2009, 18-23
- [12] *Kraśniański J., Majer S.*: Projekt koncepcyjny strefy zamieszkania na Osiedlu Światowid w Wolinie. Pracownia Projektowa Dróg, Ulic i Mostów „Damart”, Szczecin, 1999
- [13] *Majer S.; Solowczuk A.*: Traffic circle – an example of sustainable home zone design. Sustainability, **15**, 24, 2023, Article ID: 16751, DOI: 10.3390/su152416751

- [14] *Majer S.*: Strefa zamieszkania – po 20 latach eksploatacji. *Przegląd Komunikacyjny*, **79**, 4-5, 2024, 3-12
- [15] *Urbański M., Sudyka J., Grondys K.*: Expert evaluation of road infrastructure management. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **20**, 4, 2021, 465-492, DOI: 10.7409/rabdim.021.028
- [16] *Świtała M., Liszewski W.*: Typologia aktywności mieszkańców miast w zakresie ich mobilności. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **21**, 4, 2022, 343-364, DOI: 10.7409/rabdim.022.020
- [17] *Cantisani G., Corazza M.V., Di Mascio P., Moretti L.*: Eight traffic calming “easy pieces” to shape the everyday pedestrian realm. *Sustainability*, **15**, 10, 2023, 7880, DOI: 10.3390/su15107880
- [18] *Melton L., Shumard D.*: Mini roundabouts and neighborhood traffic circles. NCTCOG Public Works Roundup, City Council Regular Meeting, Burlison, USA, May 21, 2019, <https://www.nctcog.org/getmedia/57bdd772-1d6b-4d1f-a344-94ab249ec392/2019PWR-MiniRAB-FINAL.pdf> (available online: 18 July 2022)
- [19] *Rao P.S.N., Bhagwati S., Khanna S.*: City level projects: Street design guidelines. Delhi Urban Art Commission, Delhi, India, 2020
- [20] *Sobczyńska D.*: Sztuka badań eksperymentalnych. Monografia habilitacyjna, Wydawnictwo Naukowe UAM Poznań, Zeszyty Naukowe z serii „Filozofia i Logika”, nr 71, 1993
- [21] *Colaço D.*: Rethinking the role of theory in exploratory experimentation. *Biology & Philosophy*, **33**, 5-6, 2018, Article ID: 38, DOI: 10.1007/s10539-018-9648-9
- [22] *Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.*: Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka. WKŁ, Warszawa, 2008
- [23] Highway Capacity Manual (HCM). Transportation Research Board, Washington, DC, USA, 2000
- [24] *Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.*: Inżynieria ruchu. WKŁ, Warszawa, 1989
- [25] *Majer S.*: Analiza zdarzeń drogowych na wybranych rondach w Gorzowie Wielkopolskim. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne, **151**, 92, 2010, 161-173
- [26] Wirksamkeit geschwindigkeitsdämpfender Maßnahmen außerorts. Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen, Hessen, Germany, 1997, <https://docplayer.org/57666796-Wirksamkeit-geschwindigkeitsdaempfer-massnahmen.html> (available online: 28 February 2024)
- [27] *Zhong Q., Li B., Chen Y.*: How do different urban footpath environments affect the jogging preferences of residents of different genders? Empirical research based on trajectory data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, 21, 2022, Article ID: 14372, DOI: 10.3390/ijerph192114372
- [28] *Onyelowe K.C., Ebid A.M., Egbu U., Onyia M.E., Onah H.N., Nwobia L.I., Onwughara I., Firoozi A.A.*: Erodibility of nanocomposite-improved unsaturated soil using genetic programming, artificial neural networks, and evolutionary polynomial regression techniques. *Sustainability*, **14**, 12, 2022, Article ID: 7403, DOI: 10.3390/su14127403