

DOI: 10.7409/rabdim.025.008

STANISŁAW MAJER¹⁾

ORCID: 0000-0003-2476-1982

ALICJA SOŁOWCZUK²⁾

ORCID: 0000-0002-7922-7421

Post-construction surveys conclusions on the use of speed tables in traffic calming

Abstract: One of the key issues in managing street traffic of vehicles is traffic calming in built-up areas. It consists in introducing 30 km/h zones or home zones in exclusively residential areas. In Poland, the most frequently applied measures are vertical traffic calming measures due to lower construction costs and occupancy area compared to horizontal traffic calming measures. Available literature proposes different models of determining speed after the speed table (ST) or speed reduction a given ST element can trigger. In most cases, however, these are results of studies conducted in transport research laboratories or in driving simulators. This article presents results of vehicle speed measurements conducted in three example – specially selected – study areas with diverse impact factors that traffic calming designers should take into account in ST designs. Based on the vehicle speed measurements carried out, it has been demonstrated that not only does the height of ST, but also other factors such as: horizontal and vertical deflections, street function, number of exits to properties and side roads, street landscaping surroundings and geometrical parameters of STs. The above findings may become helpful with the planned road investments, in order for STs to be efficient and favour the creation of safe urban environment for all users.

Keywords: road markings, surface condition, speed reduce, speed tables, traffic calming.

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

²⁾ West Pomeranian University of Technology, Faculty of Civil and Environmental Engineering, 50 Piastów Av., 70-311 Szczecin, Poland; alicja.solowczuk@zut.edu.pl

1. INTRODUCTION

Economic and automotive growth leads to problems with traffic in built-up areas and the need to apply traffic management rules [1]. Communication problems, ever greater speed of life, and failure to apply to traffic rules do not favour guaranteeing traffic safety [2-4]. These premises led to the application of traffic calming measures, i.e. 30 km/h zones and 40 km/h zones as well as home zones that began to be applied in built-up areas in the late 20th century. The analysed foreign guidelines formulated fundamental principles of designing traffic calming measures, singling out vertical and horizontal traffic calming measures – TCMs [5-14]. Vertical TCMs include road humps: speed humps, speed tables, speed cushions and raised zebra crossings as well as raised junctions. On the other hand, horizontal traffic calming measures include: gateways, chicanes, refuge islands, median islands, horizontal deflections, staggered junctions of approaches within junctions, roundabouts, etc. Based on experimental studies described in guidelines [5], three categories of reduced speed were introduced: A – 10 mph (16 km/h), B – 15 mph (24 km/h), C – 20 mph (32 km/h), assigning to each of them a given traffic calming measure contributing to obtaining the expected speed. Speed tables (ST) and speed humps (SH) were classified as category A, while speed cushions were classified as category B. With respect to speed tables, four different types related to the shape of ramps were distinguished: sinusoidal, parabolic, round-top and flat-top. In basic project guidelines, based on studies carried out in transport research laboratories, basic dimensions of STs and their recommended spacing were provided [5, 14, 15], applied for the purpose of maintaining the expected speed category. Initial recommendations as to the selection of spacing of STs concerned achieving a specific speed average, identified as the expected speed “after” the introduction of traffic calming, i.e. with category A – the recommended spacings of STs should be as small as possible, with B – less than 60 m, whereas with C – less than 140 m [5]. The absolute minimum spacing between STs, equal to 15 m, allowing safe passage of municipal vehicles, has also been assumed. Based on the guidelines [5], it can be further assumed that 85% percentile of expected speed v_{85} is higher than average speed by 4-5 mph (6.5-8.0 km/h).

In the initial period of studies on traffic calming numerous researchers dealt with analyses of the impact of the

1. WPROWADZENIE

Rozwój gospodarczy i motoryzacyjny powoduje problemy komunikacyjne w terenach zabudowanych i konieczność stosowania zasad zarządzania ruchem [1]. Problemy komunikacyjne, coraz szybsze tempo życia oraz nie stosowanie się do zasad ruchu drogowego nie sprzyjają zachowaniu bezpieczeństwa ruchu [2-4]. Te przesłanki spowodowały, że pod koniec XX w. zaczęto stosować w terenach zabudowanych uspokojenie ruchu, tj. strefy 30 i 40 oraz strefy zamieszkania. W przeanalizowanych zagranicznych wytycznych sformułowano podstawowe zasady projektowania uspokojenia ruchu, wyróżniając pionowe i poziome środki uspokojenia ruchu (SUR) [5-14]. Do pionowych SUR zalicza się progi zwalniające liniowe, płytowe, wyspowe oraz wyniesione przejścia dla pieszych i skrzyżowania. Do poziomych SUR wlicza się natomiast: bramy wjazdowe, szykany, azyle dla pieszych, wyspy środkowe, esowanie jezdni, przesunięcia wlotów na skrzyżowaniach, ronda, itd. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych w wytycznych [5] wprowadzono trzy kategorie zredukowanej prędkości: A – 10 mph (16 km/h), B – 15 mph (24 km/h), C – 20 mph (32 km/h), do każdej z nich przypisując odpowiednio dany środek uspokojenia ruchu przyczyniający się do uzyskania oczekiwanej prędkości. Progi zwalniające płytowe (PZP) i liniowe zaliczono do kategorii A, a wyspowe do kategorii B. W przypadku PZP rozróżniono cztery podstawowe typy związane z kształtem ramp: sinusoidalne, paraboliczne, obłe i trapezowe. W podstawowych wytycznych projektowych, opierając się o badania przeprowadzone w bazach doświadczalnych podano podstawowe wymiary PZP i zalecane ich rozstawy [5, 14, 15] stosowane w celu utrzymania oczekiwanej kategorii prędkości. Początkowe zalecenia doboru rozstawu PZP dotyczyły uzyskania konkretnej prędkości średniej, utożsamianej z oczekiwaną prędkością „po” wprowadzeniu uspokojenia ruchu, czyli przy kategorii A – zalecane rozstawy PZP powinny być jak najmniejsze, przy B mniejsze niż 60 m, natomiast przy C mniejsze niż 140 m [5]. Przyjęto także bezwzględny minimalny rozstaw pomiędzy PZP równy 15 m, umożliwiający bezpieczny przejazd pojazdów komunalnych. W wytycznych [5] przyjęto, że 85% kwantyl oczekiwanej prędkości v_{85} jest większy od prędkości średniej o 4-5 mph (6,5-8,0 km/h).

W początkowym okresie badań nad uspokojeniem ruchu wielu badaczy zajmowało się analizami wpływu

applied TCMs on speed reduction by conducting measurements either in special transport research laboratories or *in situ*, or through performing simulations on specialist devices. Results of these studies were included, among others, in [5-6, 8-9, 15-19], describing the applied research methods concerning speed reduction and presenting analyses of duration of speed table impact on the maintenance of reduced vehicle speed. Similar studies taking account of various additional factors were described, among others, in [4, 18-24]. In Poland basic general guidelines for designing traffic calming measures are included in [25-26], whereas in [27] the rules of applying STs were provided together with permitted geometric parameters and conditions of placing on roads. Although these rules have been applicable in Poland already since 2003 [27], designers sometimes fail to apply them consistently [13, 18-19, 28-29]. Despite the fact that [27] provides adequate recommended geometric parameters of STs along the roadway and cross-wise, in many cases of application of the abovementioned traffic calming measures these guidelines were not observed and, as a result, untypical STs were built [13, 18-19, 28-29].

An important aspect in traffic calming areas is also the quality of concrete block pavement, in particular the applied block arrangement [23, 29, 30-32], which is related to the transfer of loads and high resistance to displacements and deformations. Results of experimental studies concerning this issue – carried out in laboratory conditions – are described in [30-31, 33-34]. On the other hand, [31, 35] contain conclusions from experimental studies carried out *in situ* on a concrete block pavement with several block arrangement variants. Conclusions presented in the aforementioned publications are unambiguous, i.e. the staggered block pattern in subsequent rows or blocks laid in a fan-shaped arrangement has been deemed most resistant to displacements when subjected to vertical forces due to the fact of dovetailing and transferring loads to individual elements through joints. Properties of these two patterns can also be achieved through applying self-locking blocks. This type of blocks is recommended for use at greater longitudinal gradients [23, 34-35]. However, there are no studies concerning the condition of a concrete block pavement applied on STs, taking account of impact of vertical forces on the pavement as a result of the overlapping of braking and acceleration forces of vehicles.

Guidelines [5] and publications [18-20, 23, 29] generally mention that while planning the location of speed tables

zastosowanych SUR na redukcję prędkości prowadząc pomiary na terenie specjalnych baz doświadczalnych, w środowisku *in situ* lub wykonując symulacje na specjalistycznych urządzeniach. Wyniki tych badań zawarto m.in. w publikacjach [5-6, 8-9, 15-19], opisując w nich zastosowane metody badawcze dotyczące redukcji prędkości oraz przedstawiając analizy długości oddziaływania PZP na utrzymanie zmniejszonej prędkości pojazdów. Podobne badania z uwzględnieniem różnych dodatkowych czynników opisano m.in. w [4, 18-24]. W Polsce podstawowe ogólne wytyczne projektowania uspokojenia ruchu zawarte są w [25-26]. Natomiast w [27] przedstawiono zasady stosowania PZP podając ich dopuszczalne parametry geometryczne i warunki umieszczania na drogach. Choć zasady te obowiązują w Polsce już od 2003 r. [27], to jednak projektanci nie zawsze konsekwentnie je stosują [13, 18-19, 28-29]. Pomimo, że w [27] podano dokładnie zalecane parametry geometryczne PZP wzdłuż jezdni i w poprzek, to w wielu przypadkach podczas wdrażania ww. elementów uspokojenia ruchu – zasad tych nie dotrzymano i wybudowano nietypowe PZP [13, 18-19, 28-29].

W obszarach ruchu uspokojonego ważnym aspektem jest również wykonawstwo nawierzchni kostkowych, a szczególnie stosowany schemat ułożenia kostek [23, 29, 30-32], co związane jest z przenoszeniem obciążeń i dużą odpornością na przemieszczenia oraz deformacje. Wyniki przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych badań doświadczalnych dotyczących tego zagadnienia opisano w [30-31, 33-34]. W [31, 35] zawarto natomiast wnioski z badań doświadczalnych wykonanych w terenie na nawierzchni kostkowej z kilkoma wariantami schematów ułożenia kostek. Wnioski przedstawione w ww. publikacjach są jednoznaczne, tj. za najbardziej odporny na przemieszczenia pod wpływem sił poziomych uznano schemat przesuniętych kostek w kolejnych rzędach lub ułożonych wachlarzowo, z uwagi na fakt zazębiania się i przenoszenia sił poziomych przez spoiny na poszczególne elementy. Właściwości tych obydwu schematów można uzyskać także stosując kostkę samoklinującą. Kostka ta jest zalecana do wykorzystania na większych pochyleniach podłużnych [23, 34-35]. Brakuje jednak badań naukowych dotyczących stanu nawierzchni z kostki betonowej zastosowanej na PZP, z uwzględnieniem oddziaływania na nią sił poziomych w wyniku nakładającego się hamowania i przyspieszania.

for the purpose of guaranteeing target speed of vehicles, the urban landscaping around that location should also be taken into account. However, these recommendations were not expanded upon in detail.

The review of previous guidelines and scientific publications has brought us to the conclusion that they lack the analyses of additional determinants that also contribute to speed reduction and better visual perception of STs by drivers. Those guidelines also failed to take account of applying additional small architecture elements in the vicinity of STs to support traffic calming, whereas the scientific publications lack descriptions of studies and analyses of combined impact of STs and small architecture elements on the reduction of vehicle speed. Therefore the authors have found it particularly significant to supplement the design guidelines with recommendations concerning:

- taking into account not only the recommended geometric parameters of STs, but also other factors characterising the immediate surroundings and spatial development of the street;
- application of noticeable and changing colours of the pavement conjoined with road markings,

which was the main objective of the research described in the present article.

The article is divided into six sections. Following the introduction containing a review of the literature, Section 2 presents research assumptions. Section 3 characterises the adopted study areas. Section 4 presents measurement and analysis methods, whereas Section 5 presents the results of studies conducted and a discussion of results of this work. The article ends with the formulation of main conclusions.

2. KEY RESEARCH ASSUMPTIONS

Taking into account the diversity of types, shapes and parameters of STs constituting a broad research spectrum, basic criteria for their selection that would safeguard uniformity of analysed data needed to be adopted. In line with the fundamentals of the experiment theory [36] it was assumed that STs built in traffic calming zones will be selected for studies. The second criterion was to select only those streets in which a speed limit of 30 km/h applied, as shown on road signs. The third criterion was to select two-way streets with a width of the roadway of 6 m. Another criterion was to single out streets with identical vehicle type structure, i.e. predominantly cars, with

Wytycznych[5] oraz w publikacjach [18-20, 23, 29] wspomina się ogólnie, że przy planowaniu lokalizacji PZP w celu zapewnienia docelowo oczekiwanej prędkości powinno się uwzględniać dodatkowo także otaczający go krajobraz miejski. Jednak szczegółowo tych zaleceń nie rozwijano.

Wnioski z przeprowadzonego przeglądu dotychczasowych wytycznych i publikacji naukowych pozwoliły stwierdzić, że brakuje w nich analiz dodatkowych determinant przyczyniających się także do redukcji prędkości i lepszego wizualnego postrzegania PZP przez kierowców. W wytycznych tych brakuje również uwzględniania zasad stosowania w najbliższym otoczeniu PZP dodatkowych elementów małej architektury wspomagających uspokojenie ruchu. Natomiast w publikacjach naukowych nie ma opisu badań i analiz łącznego wpływu PZP oraz elementów małej architektury na redukcję prędkości. Według autorów szczególnie istotne było, więc uzupełnienie obowiązujących wytycznych projektowych o zalecenia dotyczące:

- uwzględniania nie tylko zalecanych parametrów geometrycznych PZP, ale także innych czynników charakteryzujących najbliższe otoczenie i zagospodarowanie przestrzenne ulicy;
- stosowania wyraźnej zmiennej kolorystyki nawierzchni powiązanej z oznakowaniem poziomym,

co stanowiło główny cel badań prezentowanych w niniejszym artykule.

Artykuł składa się z sześciu rozdziałów. Po wprowadzeniu zawierającym przegląd literatury, w rozdziale 2 przedstawiono założenia badawcze. W rozdziale 3 scharakteryzowano przyjęte obszary badawcze. W rozdziale 4 przedstawiono metody pomiaru i analiz, a w rozdziale 5 zaprezentowano wyniki przeprowadzonych badań i dyskusję dotyczącą otrzymanych rezultatów tych prac. Artykuł zakończono sformułowaniem głównych wniosków.

2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA BADAWCZE

Biorąc pod uwagę różnorodność typów, kształtów i parametrów PZP stanowiących szerokie spektrum badawcze należało przyjąć podstawowe kryteria ich wyboru, które pozwoliłyby na zapewnienie jednorodności analizowanych danych. Zgodnie z podstawami teorii eksperymentu [36], założono, że do badań zostaną wybrane PZP wybudowane w obszarach ruchu uspokojonego. Drugim kryterium wyboru było wyselekcjonowanie tylko tych ulic, na których obowiązywał limit prędkości równy 30 km/h,

traffic of municipal vehicles allowed and a functional ban on truck traffic. The selected STs should have a width measured at the roadway level in the direction of traffic between 4.0 and 4.5 m and should be different from one another in terms of: height, flat-top, gradient and width of ramps. The STs should be made of concrete blocks of different colours and differ in terms of road marking made on ramps or in front of them. Another criterion concerned a similar, if possible, operating period of 5-10 years, that is, the STs that were built between 2015 and 2020. The last selection criterion covered: a similar surface condition on the STs and in their immediate surroundings.

For the purpose of demonstrating the cumulative impact of ST parameters and other factors characterising the immediate surroundings and spatial development of a street on traffic calming, roads at which exits to developed and not yet developed land property should qualified for studies. Additionally, taking into account the above context, both streets along which cars are parked and those within the area of which no cars are parked should be selected for vehicle speed measurements. Individual study areas should also differ from one another in terms of landscaping space of the surroundings.

3. CHARACTERISTICS OF STUDY AREAS

Taking into account the abovementioned selection criteria, three study areas were selected for studies. They are located in the street:

- combining two 30 km/h zones located in Szczecin – in a developing district with single-family housing (Fig. 1a). Not-yet-developed building plots were situated on both sides of the street, which made traffic possible only along the street, without taking turns into exits. Permissible speed in that street amounted to 40 km/h, wherein both before and after the STs built, road signs limiting speed to 30 km/h were installed. The street had a non-uniform longitudinal gradient. The first ST was built on the longitudinal gradient of 1.8%, while the second – on the longitudinal gradient of 6.8% (Fig. 1b and 1c). The road marking was performed on the asphalt surface before the ST, while its condition on both STs was judged as very good. The surface on the STs was made of orange concrete blocks, while the roadway was covered with asphalt surface. The condition of the surface on both STs was different;

podany na znakach drogowych. Trzecim kryterium był wybór ulic dwukierunkowych, o szerokości jezdni równej 6 m. Kolejnym kryterium było wyodrębnienie ulic o jednakowej strukturze ruchu, czyli przede wszystkim samochodów osobowych z dopuszczeniem ruchu pojazdów komunalnych i zakazie wjazdu pojazdów ciężarowych. Wybrane PZP powinny mieć długość mierzoną na poziomie jezdni wzdłuż kierunku ruchu w granicach 4,0-4,5 m i powinny być zróżnicowane pod względem: wysokości, długości górnej powierzchni, pochylenia i szerokości ramp. PZP powinny być wykonane z kostki betonowej o różnej kolorystyce i różnić się oznakowaniem poziomym linią P-25, wykonanym na rampach lub przed nimi. Kolejne kryterium dotyczyło w miarę możliwości zbliżonego okresu eksploatacji 5-10 lat, czyli PZP powinny być wybudowane w latach 2015-2020. Ostatnie kryterium wyboru dotyczyło podobnego stanu nawierzchni na PZP i w najbliższym ich otoczeniu.

W celu wykazania łącznego wpływu na uspokojenie ruchu parametrów PZP oraz innych czynników charakteryzujących najbliższe otoczenie i zagospodarowanie przestrzenne ulicy, do badań powinny zostać zakwalifikowane ulice, przy których znajdują się zjazdy na zabudowane i niezabudowane jeszcze posesje. Dodatkowo, uwzględniając powyższy kontekst, do pomiarów prędkości powinny być wybrane zarówno ulice, wzdłuż których zaparkowane są samochody jak i te, w obrębie których nie ma zaparkowanych samochodów na jezdni. Poszczególne obszary badawcze powinny się też różnić między sobą zagospodarowaniem otoczenia.

3. CHARAKTERYSTYKA OBSZARÓW BADAWCZYCH

Uwzględniając powyżej przedstawione kryteria wyboru wyselekcjonowano do badań trzy obszary badawcze położone na ulicy:

- łączącej dwie strefy 30 zlokalizowane w Szczecinie – w rozwijającej się dzielnicy z zabudową jednorodzinną (Rys. 1a). Po obu stronach ulicy znajdowały się niezagospodarowane jeszcze działki budowlane, co powodowało, że ruch odbywał się tylko wzdłuż ulicy bez relacji skrajnych na zjazdy. Dopuszczalna prędkość na tej ulicy była równa 40 km/h, przy czym zarówno przed jak i za wybudowanymi PZP ustawione były znaki B-33 z ograniczeniem prędkości do 30 km/h. Ulica miała niejednakowe pochylenie podłużne. Pierwszy PZP wybudowany został na pochyleniu podłużnym równym 1,8%,

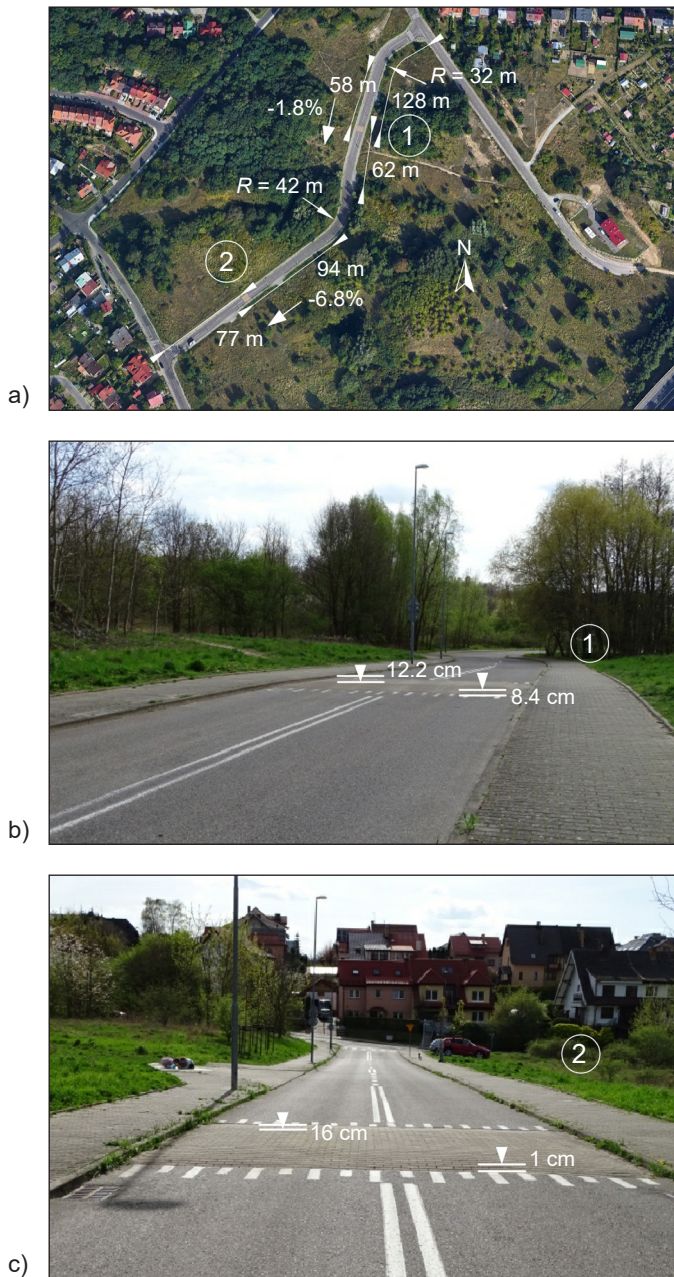


Fig. 1. Visualisation of study area 1 and photos of STs: a) study area 1, b) view of ST 1 (longitudinal gradient $i = -1.8\%$), c) view of ST 2 (longitudinal gradient $i = -6.8\%$)

Rys. 1. Wizualizacja obszaru badawczego 1 oraz fotografie PZP: a) obszar badawczy 1, b) widok PZP 1 (pochylenie podłużne jezdni $i = -1.8\%$), c) widok PZP 2 (pochylenie podłużne jezdni $i = -6.8\%$)

- diverting traffic to several residential zones in Mierzyno (Fig. 2). The ST was located between two three-inlet raised junctions, at the entrance to the 30 km/h zone. The first junction was a one-way entrance to the 30 km/h

natomiast drugi na pochyleniu 6,8% (Rys. 1b i 1c). Oznakowanie linią P-25 było wykonane na nawierzchni asfaltowej przed PZP, a jego stan na obu PZP oceniono jako bardzo dobry. Nawierzchnia na PZP wykonana była z kostki betonowej koloru pomarańczowego, a na jezdni była nawierzchnia asfaltowa. Stan nawierzchni na obu PZP był różny;

- rozprowadzającej ruch do kilku stref zamieszkania w Mierzynie (Rys. 2). PZP zlokalizowany był pomiędzy dwoma trzywlotowymi wyniesionymi skrzyżowaniami, na wjeździe do strefy 30. Pierwsze skrzyżowanie stanowiło jednokierunkowy wjazd do strefy 30. Na drugim skrzyżowaniu zastosowano dodatkowo obustronne zwężenie jezdni do jednego pasa ruchu. Na odcinku ulicy pomiędzy skrzyżowaniami nie było zjazdów i ruch odbywał się tylko w kierunku na wprost. Próg był oddalony od ronda małego o 120 m. Nawierzchnia na PZP oraz na jezdni wykonana była z kostki betonowej, przy czym na jezdni miała kolor szary, natomiast na PZP – czerwony. Stan nawierzchni oceniono jako dobry. Oznakowanie linią P-25 znajdowało się na rampach. Stan oznakowania poziomowego był średni, natomiast na śladach toczenia się kół oznakowanie było słabo widoczne i częściowo starte;



Fig. 2. Visualisation of study area 2 and photo of ST: a) study area 2, b) view of ST 3

Rys. 2. Wizualizacja obszaru badawczego 2 i fotografia PZP: a) obszar badawczy 2, b) widok PZP 3

zone. On the second junction, a double-side narrowing of the road to a single lane was applied. In the street section between the junctions there were no exits and traffic took place only straight ahead. The speed table was located 120 m from a small roundabout. The pavement on the ST and on the roadway was made of concrete blocks – grey on the roadway and red on the ST. The surface condition was recognised as good. Road marking was located on ramps. The condition of road markings was average, while on wheel paths the markings were poorly visible and partly abraded;

- located in the 30 km/h zone in Wrocław (Fig. 3). In the street with a length of approx. 560 m, five STs were built (at distances between 45 m and 88 m) and a single narrowing of the roadway to one lane by means of two raised pinch points was introduced. On both sides of the street there were exits to properties and internal access roads to multi-family housing. On a two-way roadway on its southern part – also on STs – cars of residents were parked, which led to a spontaneous narrowing of the roadway to a single lane (Fig. 3c and 3d). The manner of parking significantly influenced the traffic, as cars driving in the W-E direction stopped between parked cars to give way to cars driving in the E-W direction. If cars were parked in the vicinity of an ST, then only one car could drive over it due to limited surface area. The pavement of the ST and the roadway was made of grey concrete blocks. The condition of the surface was recognised as good. Road markings were located on ramps. The condition of road markings was average, the marking was poorly visible and practically abraded along the entire width of the STs (Fig. 3b, 3c).

The above selection of ST locations was predominantly aimed at demonstrating their efficiency in terms of speed reduction, and in the consequence providing higher vehicle traffic safety. It also served as a basis for analysing details of STs execution quality and assessment of compliance of their geometric parameters with guidelines applicable in Poland [27].

Basic geometric parameters of the analysed STs were juxtaposed in Table 1, while graphic illustration of the adopted parameters is shown in Fig. 4.

- znajdujące się w strefie 30 we Wrocławiu (Rys. 3). Na ulicy o długości ok. 560 m wybudowano pięć PZP (w odległościach od 45 m do 88 m) i jedno obustronne zwężenie jezdni do pojedynczego pasa ruchu, za pomocą wyniesionych dwóch wysp trójkątnych. Po obu stronach ulicy znajdowały się zarówno zjazdy do posesji, jak i na drogi wewnętrzne do budynków wielorodzinnych. Na dwukierunkowej jezdni po południowej jej stronie – również na PZ – stały zaparkowane samochody mieszkańców, co w rezultacie powodowało samistne zwężenie jezdni do jednego pasa (Rys. 3c i 3d). Sposób parkowania istotnie wpływał na ruch, gdyż samochody jadące w kierunku W-E zatrzymywały się pomiędzy zaparkowanymi samochodami, by przepuścić samochody jadące w kierunku E-W. Jeśli w najbliższym rejonie PZP były zaparkowane samochody, to przez ten próg z powodu ograniczenia powierzchni mógł przejechać tylko jeden samochód. Nawierzchnia na PZP oraz na jezdni była wykonana z szarej kostki betonowej. Stan nawierzchni oceniono jako dobry. Oznakowanie linią P-25 znajdowało się na rampach. Stan oznakowania był średni, a samo oznakowanie słabo widoczne i praktycznie starte na całej szerokości PZP (Rys. 3b, 3c).

Powyższy dobór lokalizacji PZP miał na celu wykazanie przede wszystkim ich skuteczności w redukcji prędkości, a w konsekwencji zapewnienie większego bezpieczeństwa ruchu. Był on także podstawą do analizy szczegółów wykonawstwa PZP oraz oceny zgodności ich parametrów geometrycznych z obowiązującymi w Polsce wytycznymi [27].

Podstawowe parametry geometryczne analizowanych PZP zestawiono w Tabl. 1, a ilustrację graficzną przyjętych parametrów przedstawiono na Rys. 4.



Fig. 3. Visualisation of study area 3 and photos of STs: a) study area 3, b) parking options near ST 4, c) parking options near STs 6 and 7, d) narrowing of the road width to one lane by a parked car at ST 5, e) way to park a car on the side slant of a ST

Rys. 3. Wizualizacje obszaru badawczego 3 oraz fotografie PZP: a) obszar badawczy 3, b) sposoby parkowania w pobliżu PZP 4, c) sposoby parkowania w pobliżu PZP 6 i 7, d) zwężenie szerokości jezdni do jednego pasa przez zaparkowany samochód na PZP 5, e) sposób parkowania samochodu na skosie bocznym PZP

Table 1. Geometrical parameters of the analysed STs
 Tablica 1. Parametry geometryczne analizowanych PZP

No. ST Nr PZP	Direction Kierunek	Geometric parameters of the analysed STs / Parametry geometryczne analizowanych PZP											
		$i_{\text{before}} / \text{przed}$ [%]	$i_1, i_2^{*)}$ [%]	$h_1, h_1^{*)}$ [cm]	l_1 [m]	l_g [m]	l_t [m]	l_2 [m]	$h_2, h_2^{*)}$ [cm]	$i_2, i_2^{*)}$ [m]	$i_{\text{after}} / \text{za}$ [%]	$l, l^{\#}$ [m]	$lf, lf^{\#}$ [m]
Study area 1 / Obszar badawczy 1													
1	S-N	1.8	9.8 7.6 ^{*)}	12.2 9.4 ^{*)}	1.23	2.16	4.60	1.21	8.4 11.0 ^{*)}	-6.9 -9.1 ^{*)}	1.8	–	58
	N-S	-1.8	6.9 9.1 ^{*)}	8.4 11.0 ^{*)}	1.21	2.16	4.60	1.23	12.2 9.4 ^{*)}	-9.8 -7.6 ^{*)}	-1.8	180	62
2	S-N	6.8	12.3 8.1 ^{*)}	16.0 10.5 ^{*)}	1.30	2.15	4.50	1.05	1.0 6.2 ^{*)}	-1.0 -5.9 ^{*)}	6.8	180	94
	N-S	-6.8	1.0 5.9 ^{*)}	1.0 6.2 ^{*)}	1.05	2.15	4.50	1.30	16.0 10.5 ^{*)}	-12.3 -8.1 ^{*)}	-6.8	–	77 [#]
Study area 2 / Obszar badawczy 2													
3	S-N	0.7	7.6	12.0	1.57	0.98	4.19	1.64	10.0	-6.1	0.7	–	120 [#]
	N-S	-0.7	6.1	10.0	1.64	0.98	4.19	1.57	12.0	-7.6	-0.7	33 ^{#)}	18 [#]
Study area 3 / Obszar badawczy 3													
4	W-E	-0.65	14.3	11.3	0.79	2.48	4.05	0.81	15.8	-19.5	-0.24	76	–
	E-W	0.24	19.5	15.8	0.81	2.48	4.05	0.79	11.3	-14.3	0.65	61	–
5	W-E	0.25	15.4	12.3	0.80	2.70	4.41	0.90	9.0	-10.0	-0.98	45	–
	E-W	0.98	10.0	9.0	0.90	2.70	4.41	0.80	12.3	-15.4	-0.25	76	–
6	W-E	-0.06	12.5	9.1	0.73	2.56	4.12	0.85	7.6	-8.9	-0.58	88	–
	E-W	0.58	8.9	7.6	0.85	2.56	4.12	0.73	9.1	-12.5	0.06	45	–
7	W-E	-0.40	18.1	14.3	0.79	2.68	4.37	0.85	11.3	-13.3	-0.75	93 ^{#)}	–
	E-W	0.75	13.3	11.3	0.85	2.68	4.37	0.79	14.3	-18.1	0.40	88	–

Designations / Oznaczenia:

i_1 – approach ramp gradient / pochylenie rampy najazdowej [%],

h_1 – approach ramp height to the ST / wysokość rampy najazdowej na PZP [cm],

l_1 – approach ramp length / długość rampy najazdowej [m],

l_g – flat top length / długość górnej powierzchni [m],

l_t – total length / długość całkowita [m],

l_2 – departure ramp length / długość rampy zjazdowej [m],

h_2 – departure ramp height from the ST / wysokość zjazdu z PZP [cm],

i_2 – departure ramp gradient / pochylenie rampy zjazdowej [%],

l – distance to the next ST / odległość do następnego PZP [m],

$l^{\#}$ – distance to another TCM / odległość do innego SUR [m],

lf – distance of horizontal curve with $R < 50$ m / odległość do łuku poziomego o $R < 50$ m [m],

$lf^{\#}$ – distance of junction / odległość do skrzyżowania [m],

^{*)} – ST height and ramp gradient calculated according to Fig. 4b and 4c on the street section with a longitudinal gradient greater than 1%; geographic directions are shown in Figs 1, 2 and 3 / wysokość PZP i pochylenie ramp liczone wg Rys. 4b i 4c na odcinku ulicy o pochyleniu podłużnym większym niż 1%; kierunki geograficzne przedstawiono na Rys. 1, 2 i 3.

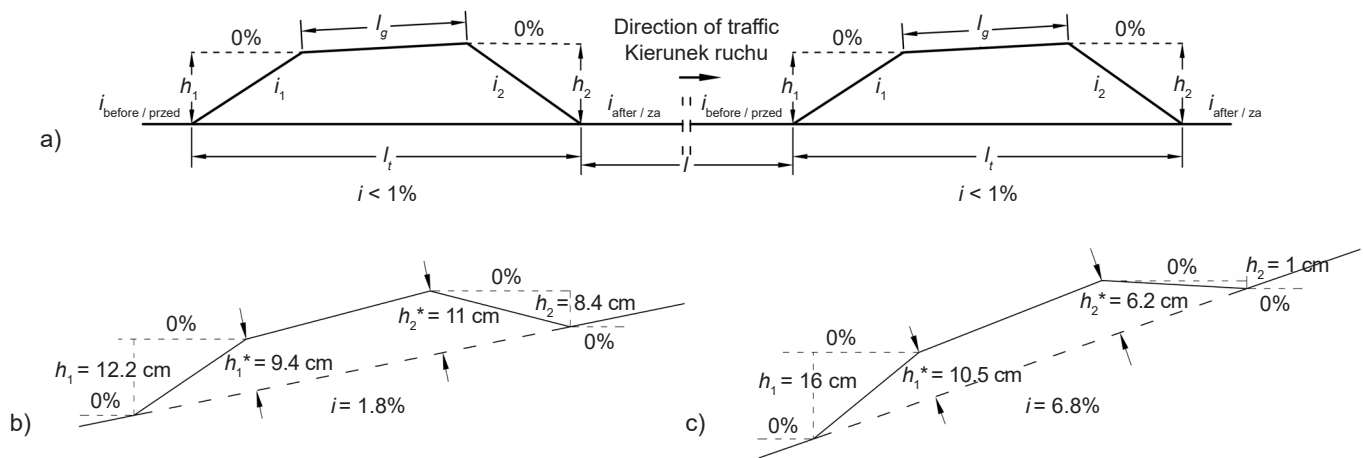


Fig. 4. Illustration of the designations from Table 1: a) traditional method of calculating ST heights h_1 and h_2 , as the difference between in the ordinates of the upper and lower edges, for a longitudinal gradient of up to 1%, b) differences in the heights of ST built on a street for a longitudinal gradient of 1.8% ($h_1 \neq h_1^*$ and $h_2 \neq h_2^*$), c) differences in the heights of ST built on a street for a longitudinal gradient of 6.8% ($h_1 \neq h_1^*$ and $h_2 \neq h_2^*$)

Rys. 4. Ilustracja oznaczeń z Tabl. 1: a) tradycyjny sposób obliczania wysokości PZP h_1 i h_2 , jako różnicy rzędnych krawędzi górnej i dolnej, przy pochyleniu podłużnym do 1%, b) różnice wysokości PZP wybudowanego na ulicy o pochyleniu podłużnym równym 1,8% ($h_1 \neq h_1^*$ i $h_2 \neq h_2^*$), c) różnice wysokości PZP wybudowanego na ulicy o pochyleniu podłużnym równym 6,8% ($h_1 \neq h_1^*$ i $h_2 \neq h_2^*$)

4. MEASUREMENT METHODS

On all analysed STs traffic measurements were carried out on working days between 10 a.m. and 4 p.m., making use of four SR4 measurement sensors that were time-synchronised with one another. Sensors were arranged at a distance of 15 m and 4 m before and after the lower edge of ST, on existing or additional posts positioned at the time of measurements. SR4 sensors provided automatic data with respect to: measurement time with accuracy of up to 0.1 s, vehicle speed, distance to a preceding vehicle, time interval and vehicle category, as well as numerous statistical data. Based on studies described in [37], vehicle speed depends on traffic density, vehicle length, and distance between vehicles given in time units. Bearing in mind the abovementioned relationships, automatic data selecting included in SR4 sensor software was used for the purpose of analysing free flow. This article describes studies taking account of vehicle free-flow only, that is the one in which a distance to a preceding vehicle measured during the passage time is equal or greater than 7 s [38].

SR4 sensors simultaneously measured vehicle speed and traffic volume in both directions. In the first study area, the hourly traffic intensity did not exceed 50 vehicles per hour, in the second study area, it varied between 200 and

4. METODY POMIARU

Na wszystkich analizowanych PZP wykonano badania ruchu w dniach roboczych pomiędzy godz. 10 a 16 z wykorzystaniem zsynchronizowanych ze sobą czasywo czterech czujników pomiarowych SR4. Czujniki były ustawiane w odległości 15 m i 4 m przed i za dolną krawędzią PZP, na istniejących lub na dodatkowych słupach, ustawianych na czas pomiarów. Czujniki SR4 podawały automatycznie dane odnośnie: czasu pomiaru z dokładnością do 0,1 s, prędkości, odległości od pojazdu poprzedzającego, odstępu czasowego i kategorii pojazdu, a także wielu danych statystycznych. Na podstawie badań opisanych w [37] prędkość zależy od gęstości ruchu, długości pojazdu i odległości między pojazdami podanej w jednostkach czasu. Mając na uwadze powyższe zależności – do analiz ruchu swobodnego wykorzystano automatyczne selekcjonowanie danych zawarte w oprogramowaniu czujników SR4. W niniejszym artykule opisano badania uwzględniające wyłącznie ruch swobodny, czyli taki, w którym odległość do pojazdu poprzedzającego mierzona w czasie przejazdu jest większa lub równa 7 s [38].

Czujniki SR4 mierzyły równocześnie prędkość i natężenie ruchu w obu kierunkach. W pierwszym obszarze badawczym godzinowe natężenie ruchu nie przewyższało

300 vehicles per hour, while in the third study area the traffic volume was between 450 and 625 vehicles per hour and was diverse between particular STs due to numerous exits, parking spaces, and side roads. In the study areas, pedestrian traffic was scarce, which means that pedestrians did not have real impact on the measured speeds.

Measurements were carried out in time allowing to obtain – as part of free-flow in each passage direction – a representative amount of data that is higher than statistically required minimum value $n_{\min} \approx 70-80$ (typical for 30 km/h zones, with measurement accuracy of up to 1 km/h guaranteed by SR4 sensors). However, taking account of possibly diverse speeds at the entrance to the 30 km/h zone in the study area 1 and 2, especially on a slope and at low traffic volume, speed measurements were conducted in subsequent working days. In the study area 3 – in order to take into account during future analyses only the data referring to the free-flow – a greater number of speed measurements were conducted, at the same time eliminating results concerning entrances to and exits from properties. These analyses also omitted speed measurements of vehicles travelling on a lane on which other cars were parked and vehicles stopping to give way in accordance with traffic rules. The abovementioned assumptions allowed acquiring measurement data for analysis in the form of four measured travel speeds of each car: two speeds before ST and two after ST.

5. RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

Since the introduction of traffic calming should first of all be related to increasing safety [2, 26], analysis was performed data on the number of traffic incidents from the years 2010-2023, acquired pursuant to [39], in all study areas, was made as part of the study. Ultimately, no traffic incidents were recorded in any of the analysed areas in the selected period, which serves as an initial proof of efficiency of speed tables.

Setting out the statistical analysis of data concerning vehicle speeds in a free-flow – for the purpose of confirming their normal distributions – a basic goodness-of-fit test was carried out with respect to the populations of results obtained. In all populations of data, normal distribution was confirmed. The analysis of speeds v_{85} and v_{av} recorded both before and after ST demonstrated (Fig. 5) that:

50 P/h, w drugim obszarze badawczym wahało się w granicach 200-300 P/h, a w trzecim obszarze natężenie ruchu mieściło się w granicach 450-625 P/h i było pomiędzy poszczególnymi PZP zróżnicowane ze względu na liczne zjazdy, miejsca parkowania i drogi boczne. W badanych obszarach badawczych ruch pieszych był znikomy, czyli piesi nie mieli realnego wpływu na mierzone prędkości.

Pomiary wykonywano w czasie zapewniającym uzyskanie – w ruchu swobodnym w każdym kierunku – reprezentatywnej liczby danych większej od wymaganej statystycznie minimalnej wartości $n_{\min} \approx 70-80$ (typowej dla stref 30 przy dokładności pomiaru do 1 km/h gwarantowanej przez czujniki SR4). Uwzględniając jednak występowanie możliwie zróżnicowanych prędkości na wjeździe do strefy 30 w obszarze badawczym 1 oraz 2, szczególnie na spadku i przy małym natężeniu ruchu, pomiary prędkości wykonano w ciągu kilku kolejnych dni roboczych. W obszarze badawczym 3 – w celu uwzględnienia podczas późniejszych analiz wyłącznie danych odnoszących się do ruchu swobodnego – wykonano większą liczbę pomiarów prędkości, ze względu na konieczną eliminację wyników dotyczących wjazdów i wyjazdów z posesji. W analizach tych pomijano również pomiary prędkości samochodów jadących pasem ruchu, na którym były zaparkowane inne samochody i zatrzymujących się, w celu udzielenia pierwszeństwa przejazdu zgodnie z zasadami ruchu. Powyższe założenia umożliwiły pozyskanie do analizy danych pomiarowych w postaci czterech zmierzonych prędkości przejazdu każdego samochodu, po dwie prędkości – przed PZP i dwie – za PZP.

5. REZULTATY BADAŃ I DYSKUSJA

Ponieważ wprowadzenie uspokojenia ruchu powinno wiązać się przede wszystkim ze zwiększeniem bezpieczeństwa [2, 26], to w ramach badań wykonano analizę liczby zdarzeń drogowych z lat 2010-2023, uzyskanych na podstawie [39], we wszystkich obszarach badawczych. Finalnie jednak w żadnym z analizowanych obszarów nie odnotowano w wybranym okresie żadnego zdarzenia drogowego, co wstępnie potwierdza skuteczność progów.

Przystępując do analizy danych dotyczących prędkości w ruchu swobodnym – w celu potwierdzenia ich rozkładu normalnego – przeprowadzono podstawowy test zgodności Kołmogorowa w odniesieniu do uzyskanych populacji. We wszystkich populacjach danych potwierdzono

- they depend not only on ST elevation;
- in the study area 1 with non-developed building plots – both speeds were higher than 30 km/h apart from a case of speed before ST on a section located on a gradient of $\approx 2\%$ or greater;
- in the study areas 1 and 2 – at a comparable height of ST in the range between 9.4 cm and 12 cm at the entrance to or exit from a 30 km/h zone, speeds before ST were similar to one another, regardless of the longitudinal gradient in the range between -1% and 6.8% ;
- in the study area 1 – on street slopes above -1% , regardless of ST location, at an entrance to or exit from a 30 km/h zone, speeds before ST were higher than 30 km/h and depended neither on ST nor longitudinal gradient of the street;
- regardless of the study area – at similar ST heights in the range between 10 cm and 12 cm, the speeds before and after ST were very diverse, which means that when planning traffic calming, the expected speeds (of up to 30 km/h) can still be unattainable despite the construction of an ST. Moreover, the study results do not confirm the forecasted impact of ST on v_{after} in particular [5-6, 8-9], therefore analysing other reasons for this phenomenon is required;
- in study areas 2 and 3 – the speeds noted before and after STs were lower than 30 km/h, which indicates that the applied STs contributed to lowering speeds in 30 km/h zones, they depended neither on ST height [5-9], nor longitudinal gradient in the $\pm 1\%$ range. However, the obtained measurement results indicated the need for further analyses in the context of establishing other reasons that can have impact on limiting vehicle speeds.

In the previous guidelines [5-9, 14] and scientific publications [15-16, 21] dependency of vehicle reductions achieved in the 30 km/h zone on the height of applied ST or spacing between the STs has been demonstrated. Fig. 6a presents changes in vehicle speeds depending on the height of ST, whereby in the study area 3 they were additionally diversified through division into two lanes: without parked cars (E-W) and with cars parked on one lane (W-E). The analysis of obtained data demonstrated that speed reduction was not achieved in every case. Moreover, the speed changes did not depend on the height of the STs, therefore dependencies from guidelines [5-9, 14] was not confirmed. Taking the above into account, Fig. 6

rozkład normalny. Analiza prędkości v_{85} i v_{sr} odnotowanych zarówno przed jak i za PZP wykazała (Rys. 5), że:

- nie zależą one tylko od wysokości PZP;
- w obszarze badawczym 1 – z niezabudowanymi jeszcze działkami budowlanymi – obie prędkości były większe niż 30 km/h, poza przypadkiem prędkości przed PZP na odcinku zlokalizowanym na wzniesieniu równym $\approx 2\%$ lub większym;
- w obszarze badawczym 1 i 2 – przy porównywalnej wysokości PZP w zakresie od 9,4 cm do 12 cm na wjeździe lub wyjeździe ze strefy 30, prędkości przed PZP były zbliżone do siebie, niezależnie od pochylenia podłużnego w zakresie od -1% do $6,8\%$;
- w obszarze badawczym 1 – na spadkach powyżej -1% , niezależnie od lokalizacji PZP na wjeździe lub wyjeździe ze strefy 30, prędkości przed PZP były większe niż 30 km/h i nie zależały ani od wysokości PZP, ani od pochylenia podłużnego ulicy;
- niezależnie od obszaru badawczego – przy zbliżonych wysokościach PZP w zakresie od około 10 cm do 12 cm, prędkości przed i za PZP były bardzo zróżnicowane, co oznacza, że przy planowaniu uspokojenia ruchu oczekiwane prędkości (do 30 km/h) pomimo wybudowania PZP mogą być nadal nieosiągalne. Wyniki badań nie potwierdzają ponadto prognozowanego wpływu PZP szczególnie na prędkość v_{za} [5-6, 8-9], a zatem wymagane jest zbadanie innych przyczyn tego zjawiska;
- w obszarach badawczych 2 i 3 – prędkości przed i za PZP były mniejsze niż 30 km/h, co wskazuje, że zastosowane PZP przyczyniły się do zmniejszenia prędkości w strefach 30 i nie zależały one ani od wysokości PZP [5-9], ani od pochylenia podłużnego w zakresie $\pm 1\%$. Otrzymane wyniki pomiarów wskazały jednak na potrzebę dalszych analiz w kontekście ustalenia innych przyczyn mogących mieć wpływ na ograniczenie prędkości.

W dotychczasowych wytycznych [5-9, 14] oraz publikacjach naukowych [15-16, 21] wykazano zależność używanych w strefie 30 redukcji prędkości od wysokości wybudowanych PZP lub ich rozstawu. Na Rys. 6a przedstawiono zmiany prędkości, w zależności od wysokości PZP, przy czym w obszarze badawczym 3 zróżnicowano je dodatkowo dzieląc na dwa pasy ruchu: bez zaparkowanych samochodów (E-W) i z zaparkowanymi samochodami na jednym pasie ruchu (W-E). Analiza otrzymanych

presents the obtained results ordered in individual study areas by speed changes, together with the provision of data concerning longitudinal gradient and a distance of the ST: to the junction at the entrance to the 30 km/h zone – marked as a , from the junction at the exit from the 30 km/h zone – marked as b , and a distance to the next ST or TCM – marked as c . The analysis of data presented in Fig. 6 demonstrated that:

- at the entrance to the 30 km/h zone speed changes were diverse and depended mainly on longitudinal gradient of a given street section, but they depended neither on the ST height, nor on the ST location against the junction or a traffic calming measure visible in front of it;
- at the exit from the 30 km/h zone speed changes depended mainly on longitudinal gradient of a given street section and they depended neither on the distance of ST to the preceding junction, nor on the ST height;
- in the 30 km/h zone with several STs applied, with respect to the speeds recorded during the travel on a lane without cars parked on the roadway, speed changes depended both on the ST height and the distance to the next ST. On the other hand, on the lane with cars parked on the roadway, speed changes were inversely proportionate to the ST height.

danych wykazała, że nie we wszystkich przypadkach uzyskano redukcję prędkości. Ponadto zmiany prędkości nie były zależne od wysokości PZP, czyli nie potwierdzono zależności z wytycznych [5-9, 14]. Biorąc powyższe pod uwagę na Rys. 6b przedstawiono otrzymane wyniki uporządkowane w poszczególnych obszarach badawczych pod względem zmian prędkości z podaniem jednocześnie danych odnośnie pochylenia podłużnego i odległości PZP: do skrzyżowania na wjeździe do strefy 30 – oznaczonej jako a , od skrzyżowania na wyjeździe ze strefy 30 – oznaczonej jako b oraz odległości do kolejnego PZP lub SUR – oznaczonej jako c . Analiza danych przedstawionych na Rys. 6b wykazała, że:

- na wjeździe do strefy 30 zmiany prędkości były zróżnicowane i zależały głównie od pochylenia podłużnego danego odcinka ulicy, lecz nie były zależne ani od wysokości PZP, ani od lokalizacji PZP względem widocznego przed nim skrzyżowania czy też środka uspokojenia ruchu;
- na wyjeździe ze strefy 30 zmiany prędkości zależały głównie od pochylenia podłużnego danego odcinka ulicy i nie były zależne ani od odległości PZP od poprzedzającego go skrzyżowania, ani od wysokości PZP;

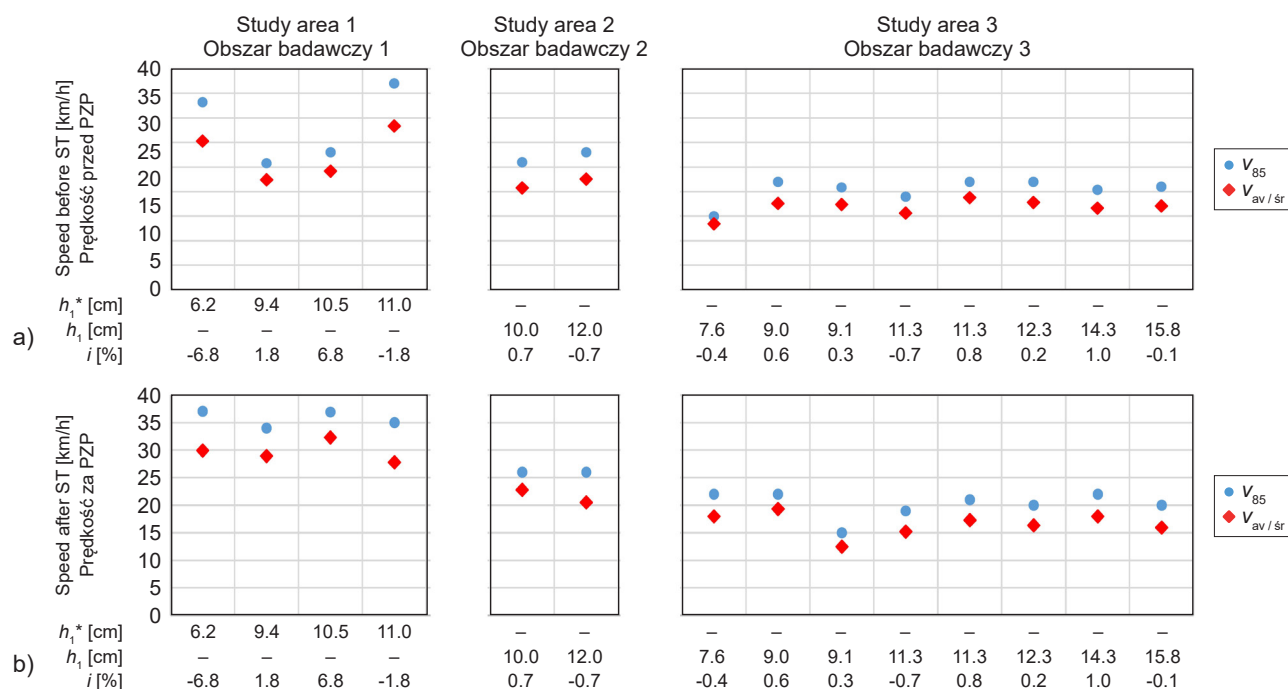


Fig. 5. Speed results in case of different ST heights for three for three study areas: a) speed before ST, b) speed after ST (height h_1^* acc. to Fig. 4)
 Rys. 5. Rezultaty prędkości w przypadku różnych wysokości PZP w trzech obszarach badawczych: a) prędkość przed PZP, b) prędkość za PZP (wysokość h_1^* zgodnie z Rys. 4)

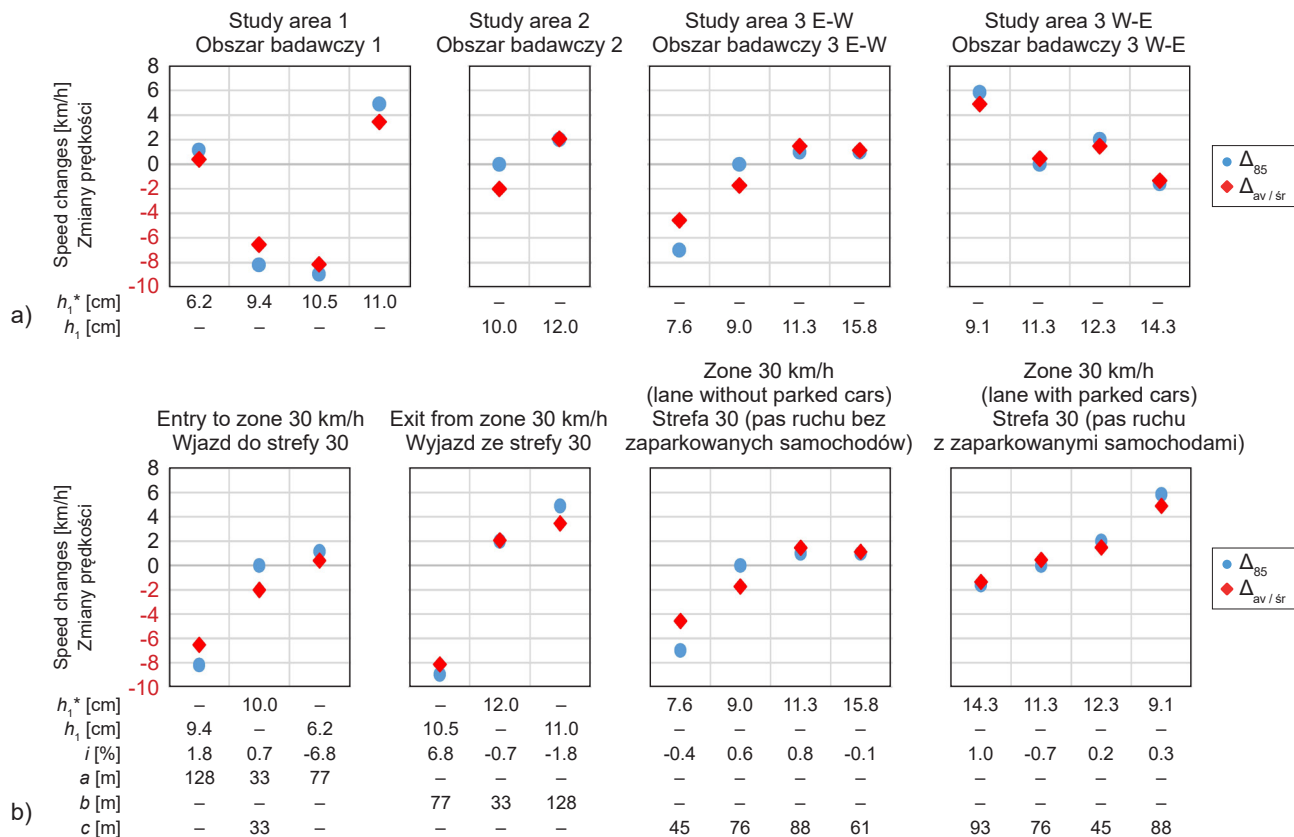


Fig. 6. Speed changes $\Delta v = v_{\text{before}} - v_{\text{after}}$ – in individual study areas: a) ordered by ST height, b) ordered by Δv
 Rys. 6. Zmiany prędkości $\Delta v = v_{\text{przed}} - v_{\text{za}}$ – w poszczególnych obszarach badawczych: a) względem wysokości PZP, b) uszeregowane narastająco

Summing up, the performed analyses proved that speed changes were each time very diverse and not always did the STs influence the expected speed reduction – quite the opposite: they more than once contributed to the speed increase. Therefore, the obtained study results did not confirm the data presented in guidelines [5-9, 14] suggesting that application of STs shall each time cause reduction of vehicle speed and that it also depends on the spacing between subsequent STs located in the 30 km/h zone.

Taking into account the abovementioned observations, subsequent analyses were performed considering other factors characteristic for the study areas under scrutiny, which can possibly contribute to speed changes the the ST area. They may include: 1) locating the ST in the 30 km/h zone, 2) presence of exits to the existing land development in its vicinity, 3) visibility conditions concerning this development, 4) visibility farther road perspective after the ST, 5) colours of concrete blocks applied on the ST [5, 25, 27] and 6) visibility of road markings on the

- w strefie 30 z zastosowanymi kilkoma PZP, w odniesieniu do prędkości odnotowanych podczas przejazdu po pasie ruchu bez zaparkowanych samochodów na jezdni zmiany prędkości zależały zarówno od wysokości PZP jak i odległości do następnego PZP. Natomiast na pasie z samochodami zaparkowanymi na jezdni zmiany prędkości były odwrotnie proporcjonalne do wysokości PZP.

Reasumując, wykonane analizy udowodniły, że zmiany prędkości były każdorazowo bardzo zróżnicowane i nie zawsze PZP wpływały na oczekiwaną redukcję prędkości, a wręcz przeciwnie – przyczyniały się niejednokrotnie do wzrostu prędkości. Otrzymane wyniki badań nie potwierdziły, zatem danych przedstawionych w wytycznych [5-9, 14] sugerujących, że wybudowanie PZP powoduje na nim każdorazowo redukcję prędkości i że jest ona zależna również od rozstawu między kolejnymi PZP zlokalizowanymi w strefie 30.

Uwzględniając powyższe spostrzeżenia wykonano kolejne analizy rozważając inne czynniki, charakterystyczne

approach ramp. Considering the above factors, the analysis of impact of the following determinants on vehicle speeds was carried out:

- A – entrance to the 30 km/h zone, equated with distance of the ST from the preceding junction,
- B – exit from the 30 km/h zone, equated with distance of the ST to the preceding or subsequent junction, depending on its location,
- C – presence of exits to the existing residential development or to internal access roads (in close proximity to the location of ST), expressed by their number,
- D – cars parking on a lane in a given direction of vehicle traffic,
- E – visible residential development on the right side of the roadway,
- F – visible subsequent STs or other traffic calming measures located after a given ST, equated with their distance after the analysed ST,
- G – visible road markings on approach ramps,
- H – red concrete blocks applied on the ST pavement.

During the analysis of determining the impact of a given determinant, rules equated with logical tautology were adopted, i.e. a mark (+) was applied at its confirmation or mark (–) at its negation. In the case of determinants A, B, C and F, for the purpose of better interpretation of analysis results, instead of a confirmation (+), the appropriate numerical values identified with them were used (Fig. 7).

The analysis of data shown in Fig. 7 demonstrated that:

- efficiency of the STs located in the 30 km/h zones depends on their location at the entrance to the zone, exit from it or in the zone, and on the characteristics of the surroundings;
- at the entrances to 30 km/h zones speeds v_{before} depend total on the height of STs, visibility of development and subsequent TCMs on sections with longitudinal gradient of up to $\pm 2\%$. Visibility of subsequent TCMs after the ST may depend on: their distance to ST, colour of the concrete block applied on the ST as well as road marking;
- application of ST on entrances to or exits from the 30 km/h zone contributes to reaching lower speeds than 30 km/h before ST, if applied on sections with low longitudinal gradient of up to 1% or on gradients. On slopes – speeds reached by vehicles before ST are higher than 30 km/h;

w rozpatrywanych obszarach badawczych, a mogące przyczynić się do zmian prędkości w rejonie PZP. Można do nich zaliczyć: 1) lokalizację progów w strefie 30, 2) obecność zjazdów do istniejącej zabudowy znajdującej się w jego pobliżu, 3) warunki widoczności istniejącej zabudowy, 4) widoczność dalszej perspektywy jezdni za PZP, 5) kolorystykę kostek betonowych zastosowanych na PZP [5, 25, 27], 6) widoczność oznakowania na rampie najazdowej. Biorąc pod uwagę powyższe czynniki przeprowadzono analizę wpływu na prędkość pojazdów następujących determinant:

- A – wjazd do strefy 30, utożsamiany z odległością PZP od skrzyżowania go poprzedzającego,
- B – wyjazd ze strefy 30, utożsamiany z odległością PZP względem skrzyżowania go poprzedzającego lub po nim następującego, w zależności od jego lokalizacji,
- C – obecność zjazdów do istniejącej zabudowy mieszkalnej lub na drogi wewnętrzne (w bezpośredniej bliskości do lokalizacji PZP), wyrażoną ich liczbą,
- D – fakt zaparkowania samochodów na pasie ruchu w danym kierunku ruchu,
- E – widoczna zabudowa mieszkalna po prawej stronie jezdni,
- F – widoczne za danym PZP kolejne progi lub inne środki uspokojenia ruchu, utożsamiane z ich odległością za analizowanym PZP,
- G – widoczne oznakowanie poziome (P-25) na rampach najazdowych,
- H – zastosowane w nawierzchni PZP czerwone kostki betonowe.

Podczas analizy określania wpływu danej determinanty przyjęto zasady utożsamiane z tautologią logiczną, tzn. zastosowano przy jej potwierdzeniu oznaczenie (+) lub przy zaprzeczeniu oznaczenie (–). W przypadku determinant: A, B, C i F w celu lepszej interpretacji wyników analizy zamiast (+) zastosowano utożsamiane z nimi odpowiednie wartości liczbowe (Rys. 7).

Analiza danych przedstawionych na Rys. 7 wykazała, że:

- skuteczność progów usytuowanych w strefach 30 zależy od ich lokalizacji na wjeździe do strefy, wyjeździe z niej lub w strefie oraz od charakterystyki otoczenia;
- na wjazdach do strefy 30 prędkości v_{przed} zależą łącznie od wysokości progów, widoczności zabudowy i kolejnych SUR na odcinkach o pochyleniu podłużnym

- in the 30 km/h zone the application of STs efficiently contributes to maintaining speed at the level below 30 km/h both before and after the speed table. However, installation of an ST not always contributes to the reduction of vehicle speeds. If a subsequent ST is located in close proximity to the preceding one, then it contributes to increased speed on a lane without parked cars and provokes drivers to select uncontrolled vehicle trajectories, including driving along sidewalks on a section from an exit preceding the street table to an exit present after it (Fig. 8b), thus avoiding vehicle vibrations resulting from a difference in height. More stabilised speeds before and after ST were recorded on a lane with parked cars, while speed reduction depended on the height of the ST applied.

Observations made during studies allowed to indicate reasons for uncontrolled passages across the STs in the study area 3 (Fig. 8b and 8d). They included, above all, parameters of STs that did not comply with the applicable guidelines [27] (Fig. 8 and 9) as well as inappropriate traffic organisation that allowed parking cars only on one lane. In project guidelines [5], in order to avoid the observed improper driver behaviour (i.e. driving on the sidewalk without passing the threshold) it is recommended to apply small architecture elements on the sidewalk or security bollards in the vicinity of STs (Fig. 8a and 8c), which act as a warning with respect to driver reactions, significantly narrowing their optical image of the actual passage width [5]. With respect to traffic organisation between individual STs, in the case of planning parking spaces in designated areas (30 km/h zones), based on conclusions drawn from publications [20, 24, 28-29, 40] it was proposed to apply alternate parking between the STs instead of one-sided parking along the entire street.

do $\pm 2\%$. Widoczność następnych SUR za danym PZP może zależeć od: ich odległości od danego PZP, koloru kostki betonowej zastosowanej na PZP i oznakowania;

- stosowanie PZP na wjazdach lub wyjazdach ze strefy 30 przyczynia się do osiągnięcia mniejszych prędkości niż 30 km/h przed PZP, w przypadku ich lokalizacji na odcinkach o małym pochyleniu podłużnym do 1% lub wzniesieniach. Na spadkach – osiągnięte prędkości pojazdów przed PZP są większe niż 30 km/h;
- w strefie 30 stosowanie PZP skutecznie przyczynia się do utrzymania prędkości na poziomie poniżej 30 km/h zarówno przed jak i za progiem. Nie zawsze jednak zastosowanie PZP powoduje redukcję prędkości. Jeśli kolejny PZP znajduje się w bliskiej odległości od poprzedzającego, to na pasie ruchu bez zaparkowanych samochodów przyczynia się on do zwiększenia prędkości i prowokuje kierowców do wyboru niekontrolowanych trajektorii ruchu samochodów włącznie z jazdą po chodnikach na odcinku od zjazdu poprzedzającego próg do zjazdu za nim następującego (Rys. 8b), unikając w ten sposób wstrząsów samochodu wynikających z różnicy wysokości. Bardziej ustabilizowane prędkości przed i za PZP odnotowano na pasie ruchu z zaparkowanymi samochodami, a redukcja prędkości zależała od wysokości zastosowanego PZP.

Obserwacje wykonane w trakcie prowadzenia badań pozwoliły na wskazanie przyczyn niekontrolowanych przejazdów przez PZP w obszarze badawczym 3 (Rys. 8b i 8d). Zaliczono do nich przede wszystkim niezgodne z obowiązującymi wytycznymi [27] parametry progów (Rys. 8 i 9) oraz niewłaściwą organizację ruchu, dopuszczającą parkowanie samochodów tylko na jednym pasie. W wytycznych projektowych [5] w celu uniknięcia nieprawidłowych zachowań kierowców (tj. przejazdów po chodniku z ominięciem progu) zaleca się stosowanie na chodniku elementów małej architektury lub słupków w pobliżu PZP (Rys. 8a i 8c), co wpływa ostrzegawczo na reakcje kierowców, istotnie zawężając im optyczną szerokość przejazdu [5]. W odniesieniu do zasad organizacji ruchu pomiędzy poszczególnymi PZP w przypadku planowania w wyznaczonych strefach 30 miejsc parkingowych zaproponowano na podstawie wniosków z publikacji [20, 24, 28-29, 40] stosowanie naprzemiennego parkowania pomiędzy PZP, zamiast jednostronnego parkowania wzdłuż całej ulicy.

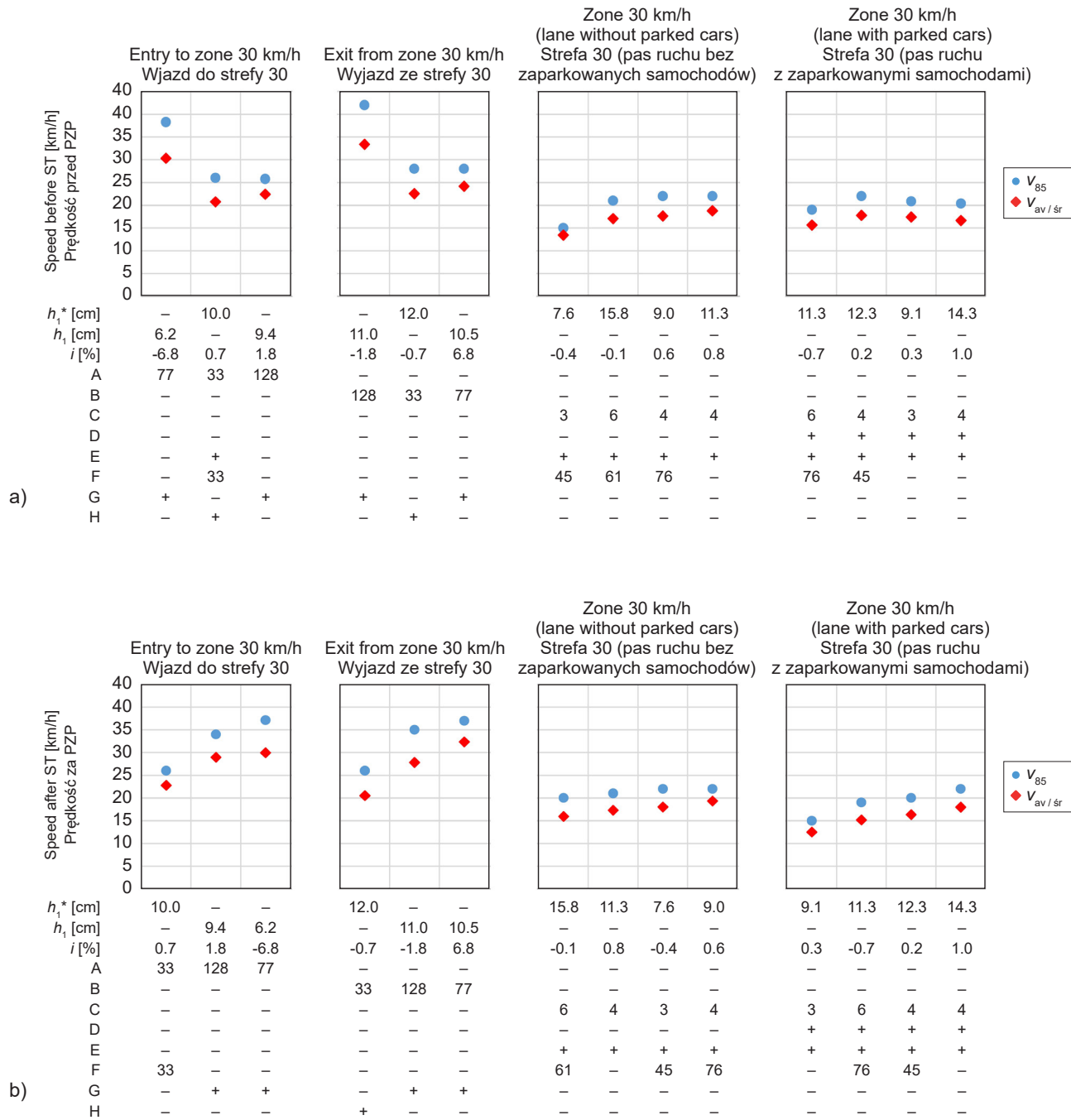


Fig. 7. Speed results with the adopted determinants: a) before the ST, b) after the ST

Rys. 7. Rezultaty prędkości z uwzględnieniem przyjętych determinant: a) przed PZP, b) za PZP

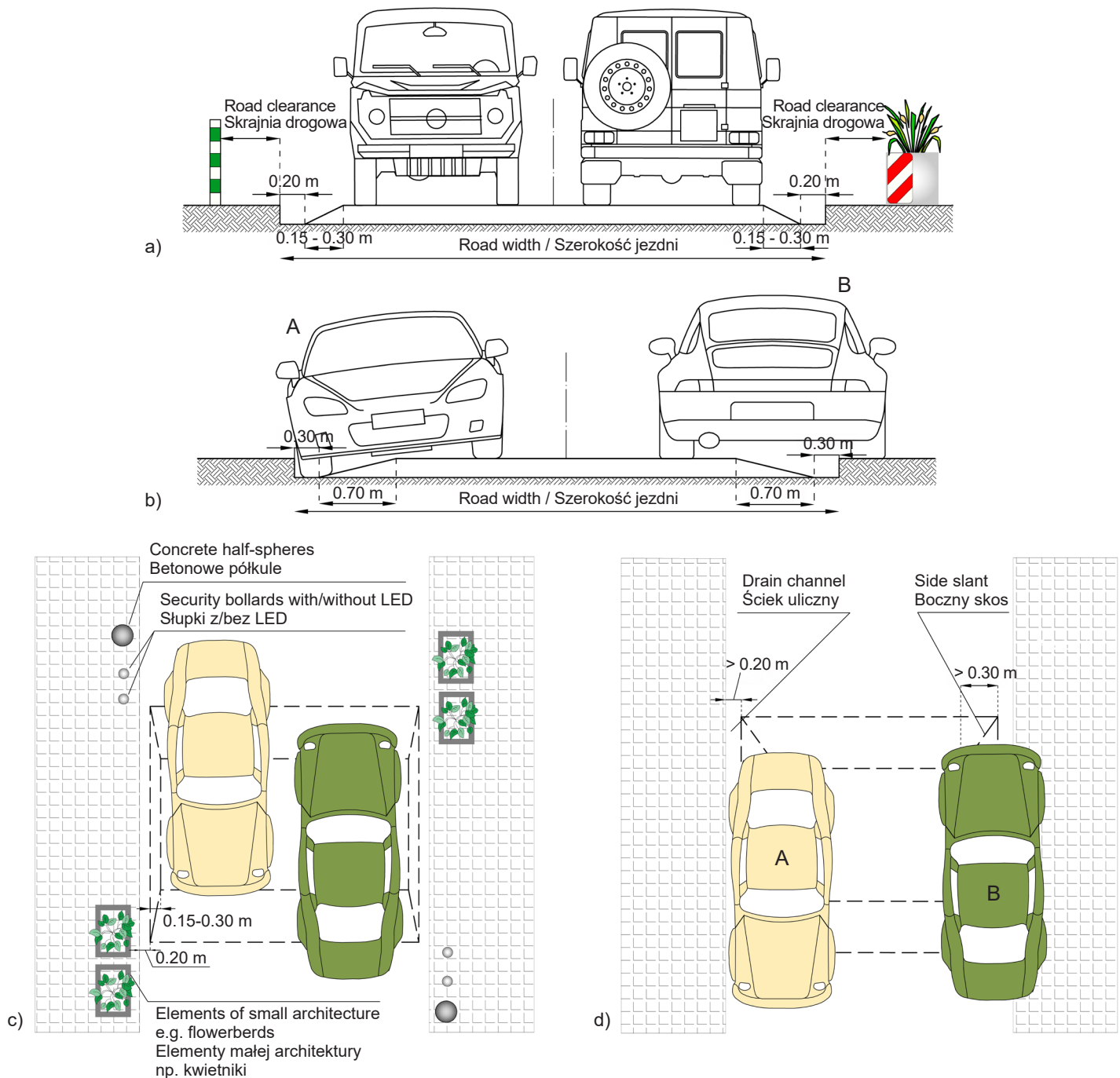


Fig. 8. Methods of passing through the ST: a) according to applicable guidelines [27], b) various passages through the ST observed during the measurements, c) visualisation of the use of small architecture elements to obtain the recommended passage of cars through the ST, d) visualisation of the recorded in the measurements driving through the ST on the drain channel and side slope (car A) or on along the sidewalk (car B)

Rys. 8. Sposoby przejazdu przez PZP: a) wg obowiązujących wytycznych [27], b) zaobserwowane podczas pomiarów różne przejazdy przez PZP, c) wizualizacja stosowania elementów małej architektury w celu uzyskania zalecanego przejazdu samochodów przez PZP, d) wizualizacja zarejestrowanego podczas pomiarów przejazdu przez PZP po ścieku ulicznym i bocznym skosie progu (samochód A) lub po chodniku (samochód B)

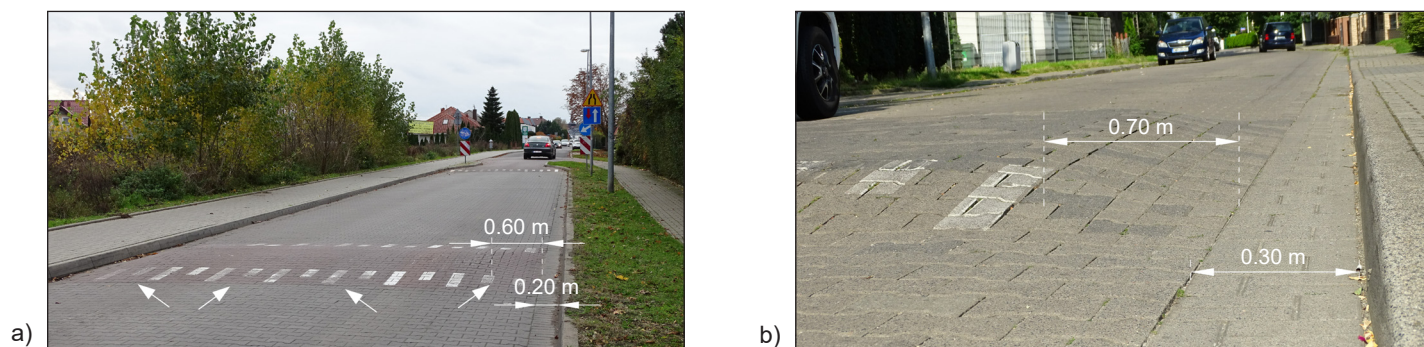


Fig. 9. Cases of ST built contrary to applicable guidelines recorded in the research: a) ST in study area 2, b) exemplary ST in study area 3
 Rys. 9. Odnotowane w badaniach przypadki PZP wybudowanych niezgodnie z obowiązującymi wytycznymi: a) próg w obszarze badawczym 2, b) przykładowy PZP w obszarze badawczym 3

During the studies, attention was paid to another problem concerning the construction of STs from concrete blocks on a street with a large longitudinal gradient. In the study area 1, the second ST was located on a longitudinal gradient of the roadway equal to 6.8%. At the approach to the ST, on the elevation, significant speed reduction (Fig. 7a) and sudden speed increase after the ST (Fig. 7b) were recorded. Considerably higher vehicle speeds were recorded in the other travel direction – along the slope (Fig. 7). What turned out significant in this case was the condition of the surface on the ST, in particular on the lane located on the roadway slope. Individual rows of blocks were offset (Fig. 10c and 10d), which attested to their exposure to considerable horizontal and vertical forces. In line with the conclusions provided in articles [29-31, 33, 35], with respect to concrete block pavements displacements of their individual rows depend largely on their laying pattern. Publications [33, 35] describe the possibilities of displacement of concrete blocks exposed to vertical and horizontal loads in pavements laid on a moderate longitudinal gradient of a road. On the other hand, articles [23, 32] formulate conclusions from analyses of deformations of concrete block pavements arranged in different patterns on steep longitudinal gradients. It results from the abovementioned publications that concrete blocks with regular shape, laid in areas more exposed to vertical forces (at acceleration Fa or braking Fd) are less resistant to displacement than self-locking concrete blocks. However, in both cases care must be taken to secure as small a width of joints between them as possible. Moreover, on STs built on longitudinal gradients greater than 1% the concrete block pavement should be separated from the asphalt pavement with a kerb. Displacements of individual rows and blocks visible in Fig. 10c

Podczas prowadzenia badań zwrócono również uwagę na kolejny problem, dotyczący budowania PZP z kostki betonowej, na ulicy o dużym pochyleniu podłużnym. W obszarze badawczym 1 drugi PZP zlokalizowany był na pochyleniu podłużnym jezdni równym 6,8%. Przy dojeździe do PZP na jego wzniesieniu odnotowano duże zmniejszenie prędkości (Rys. 7a) i nagle jej zwiększenie za PZP (Rys. 7b). Znacznie większe prędkości pojazdów zarejestrowano w drugim kierunku ruchu – wzdłuż spadku (Rys. 7). W tym przypadku istotny okazał się aktualny stan nawierzchni na PZP, szczególnie na pasie ruchu zlokalizowanym na spadku jezdni. Poszczególne rzędy kostek były przesunięte (Rys. 10c i 10d), co świadczyło o dużym oddziaływaniu na nie zarówno sił poziomych, jak i pionowych. Zgodnie z wnioskami zawartymi w artykułach [29-31, 33, 35] w przypadku nawierzchni kostkowych przemieszczenia poszczególnych jej rzędów zależą w dużej mierze od schematu ich ułożenia. W pracach [33, 35] opisano możliwości przemieszczania kostek betonowych podlegających obciążeniom pionowym i poziomym w nawierzchniach układanych na niewielkich pochyleniach podłużnych dróg. Natomiast w artykułach [23, 32] sformułowane zostały wnioski z analiz deformacji nawierzchni kostkowych ułożonych według różnych schematów na stromych pochyleniach podłużnych. Z ww. publikacji wynika, że kostki betonowe o regularnych kształtach ułożone w obszarach o zwiększonym oddziaływaniu sił poziomych (przy przyspieszaniu Fa lub hamowaniu Fd) są mniej odporne na przesunięcia niż kostki samoklinujące się. W obu jednak przypadkach należy zadbać o jak najmniejsze szerokości spoin. Ponadto przy PZP wybudowanych na pochyleniach podłużnych większych niż 1% nawierzchnia kostkowa powinna być oddzielona od nawierzchni asfaltowej krawężnikiem. Przemieszczenia

and 10d attest to performance and design flaws. Most probably, the concrete block pavement with wide joints, laid on a large slope, turned out to be of little resistance to horizontal stagger. Due to the presence of wide joints, shearing forces between individual blocks contributed to their curvilinear stagger visible in wheel paths. The pavement structure applied in this case also failed to handle the transfer of vertical loads onto the sand bedding and bottom layers. Additionally, vertical stagger of individual blocks may attest to a poor selection of block thickness or weak substructure (Fig. 10d) even at low traffic loads [30]. Fig. 11e shows a place at which oppositely directed vertical acceleration Fa and deceleration Fd forces coming from front ($Fa1$ and $Fd1$) and rear wheels ($Fa2$ and $Fd2$) overlap, in which the greatest vertical and horizontal displacements and deflections were found (Fig. 10c and 10d). Fig. 10e shows vertical forces F triggered by load exerted by front $F1$ and rear $F2$ wheels. Fig. 10c and 10d present, in close-up, fragments of deflections of the pavement indicated accordingly by arrows, wherein the first photo presents rows of blocks displaced curvilinearly, while the second – vertical displacements and considerably widened joints.

The last issue examined in the article was the problem of condition of road markings applied on the ST, as it was referred to as unsatisfactory (Fig. 3b, 3c and 3d). In the analysed study areas, different colours of concrete blocks were applied on the STs, but unfortunately, in the opinion of the paper's authors, the contrast between them is too low. In this context, it is recommended to apply red blocks on the ST, whereas the road marking of the ramp should be made of white and red blocks. Application of the laying pattern as staggered self-locking blocks (white and red) leads to a situation in which the road marking is uneven. For the abovementioned reason it can therefore be considered to introduce changes to the previous Polish guidelines [27] and recommend in accordance with [5, 7-8], the application of other type of road markings, e.g. in the form of triangles made of thick-layer masses, placed on a ramp – exclusively between the wheel path, adjusted to concrete blocks and taking into account the difference in rigidity between the two materials.

poszczególnych rzędów i pojedynczych kostek widoczne na Rys. 10c i 10d świadczą o błędach wykonawczych i projektowych. Prawdopodobnie nawierzchnia kostkowa o szerokich spoinach, ułożona na dużym spadku, okazała się za mało odporna na przemieszczenia poziome. Siły ścinające pomiędzy poszczególnymi kostkami w przypadku występowania szerokich spoin przyczyniły się do ich krzywoliniowych przemieszczeń w śladach tocznienia się kół. Zastosowana w danym przypadku konstrukcja nawierzchni nie poradziła sobie również z przenoszeniem obciążeń pionowych na podsypkę piaskową i na dolne warstwy. Dodatkowo przemieszczenia pionowe poszczególnych kostek świadczyć mogą o złym doborze grubości kostek lub o słabej podbudowie (Rys. 10d) nawet przy małym obciążeniu ruchem [30]. Na Rys. 11e przedstawiono miejsce nakładania się przeciwnie skierowanych sił poziomych przyspieszania Fa i hamowania Fd od kół przednich ($Fa1$ i $Fd1$) oraz tylnych ($Fa2$ i $Fd2$), w których stwierdzono największe przesunięcia i deformacje pionowe oraz poziome (Rys. 10c i 10d). Na Rys. 10e zobrazowano siły pionowe F od obciążenia koła przedniego $F1$ i tylnego $F2$. Na Rys. 10c i 10d przedstawiono w powiększeniu – fragmenty deformacji nawierzchni odpowiednio wskazane strzałkami, przy czym na pierwszym ze zdjęć pokazano przesunięte krzywoliniowo rzędy kostek, a na drugim – przesunięcia pionowe i znacznie poszerzone szerokości spoin.

Ostatnim zagadnieniem podjętym artykule był problem stanu oznakowania poziomego zastosowanego na PZP. Określono go, bowiem jako niezadowalający (Rys. 3b, 3c i 3d). W analizowanych obszarach badawczych zastosowano na PZP różne kolory kostek betonowych, lecz niestety – zdaniem autorów – zbyt mało kontrastujące ze sobą. W tym kontekście na PZP zaleca się stosować kostki koloru czerwonego, a oznakowanie skosu ramp powinno być wykonane z kostki koloru białego i czerwonego. Stosowanie schematu ich ułożenia jako przesuniętych dwukolorowych kostek samoblokujących powoduje, że linia P-25 jest nierówna. Z ww. powodu można, zatem rozważyć zmiany w dotychczasowych polskich wytycznych [27] i zastosować inne oznakowanie zalecane w [5, 7-8], np. w postaci trójkątów umieszczanych wyłącznie pomiędzy śladami kół na rampie progu zwalniającego, wykonanych z mas grubowarstwowych, dostosowanych do kostek betonowych i uwzględniających różnicę sztywności obu materiałów.

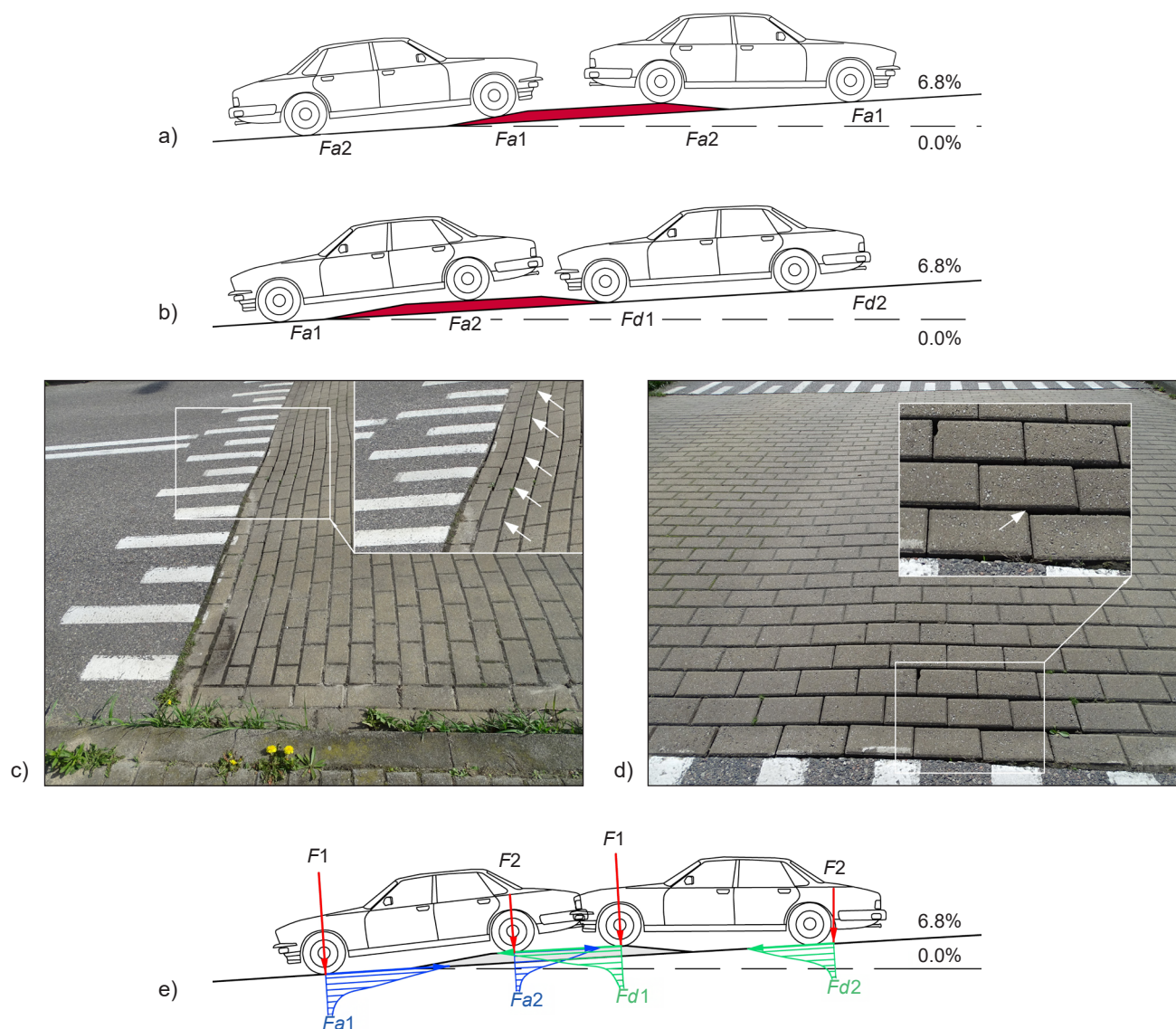


Fig. 10. Driving on a ST and the condition of the surface on a ST built on a longitudinal gradient – 6.8%: a) driving on a slope, b) driving on a hill, c) view of curvilinearly shifted rows of concrete cubes, d) view of vertically and horizontally shifted cubes and widened joints, e) overlapping of horizontal forces during braking and acceleration in the upper part of the ST when riding on a slope.

Rys. 10. Przejazd po PZP i stan nawierzchni na PZP wybudowanym na pochyleniu podłużnym – 6,8%: a) jazda na spadku, b) jazda na wzniesieniu, c) widok przesuniętych krzywoliniowo rzędów kostek betonowych, d) widok przesuniętych w pionie i poziomie kostek oraz poszerzonych spoin, e) nakładanie się sił poziomych przy hamowaniu i przyspieszaniu w górnej części PZP podczas jazdy na spadku

6. CONCLUSIONS

Based on the studies of the impact of speed tables to reduce speed below 30 km/h conducted in the paper and analyses of determinants, the following conclusions have been formulated:

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań wpływu progów zwalniających płytowych na zmniejszenie prędkości i wyników analiz determinant sformułowano następujące wnioski:

1. The application of STs on sections of streets with a speed limit of 30 km/h contributes to maintaining reduced vehicle speed, however not all STs, regardless of their height, trigger its reduction. The speed before and after ST depends, apart from the ST's height, on: spacing of STs, visibility of subsequent STs, characteristics of the surroundings as well as other cars being parked on a given lane.
 2. Vehicle speeds at the entry to or exit from the 30 km/h zone depend mainly on the longitudinal gradient of the roadway, visibility of other TCMs or location of a junction after the ST, and to a lesser degree, on the height of STs.
 3. When applying several STs in the 30 km/h zone, vehicle speeds depend mainly on the spacing of STs, the manner of parking on the roadway, the number of exits and landscaping space of the surroundings. In the 40 km/h zones, in which parking of cars on the roadways is provided for, their alternate arrangement between the STs should be planned, as it is going to contribute to maintaining appropriate vehicle trajectories in both directions, without entering sidewalks and side slants of the STs or drain channels located next to them.
 4. When designing the STs, it is necessary to use steep side slopes and small architectural elements (Fig. 8a), as they will efficiently make it difficult for cars to drive over side slants or drain channels and will prevent impermissible driving on sidewalks. The application of steep side slants contributes to using correctly demarcated vehicle swept paths and provides maintaining good condition of the pavement throughout the service life. Possibility of using small architectural elements in STs depends on the available sidewalk width, which is directly related to maintaining the obligatory road clearance and provisions of minimum width of a sidewalk for pedestrians.
 5. On the roadway's longitudinal gradient larger than 2%, in the case of building the STs, only pavements made of self-locking concrete blocks should be applied, as they are more resistant to displacements in the area of accumulated and overlapping vertical forces with opposite directions during vehicle braking and acceleration.
 6. For the construction of STs, red concrete blocks should be applied, as they are more visible to a driver even in periods of reduced visibility. On ramps, blocks of
1. Zastosowanie PZP na odcinkach ulic z limitem prędkości równym 30 km/h przyczynia się do utrzymania zmniejszonej prędkości pojazdów, jednak nie wszystkie PZP, niezależnie od ich wysokości, powodują jej redukcję. Na prędkość przed i za progiem ma wpływ oprócz jego wysokości także: rozstaw progów, widok kolejnych PZP, charakterystyka otoczenia oraz parkowanie na danym pasie ruchu innych samochodów.
 2. Prędkości przy wjazdach lub wyjazdach ze strefy 30 zależą w głównej mierze od pochylenia podłużnego jezdni, widoczności innych SUR lub widoczności skrzyżowania znajdującego się za PZP, a w mniejszej części od wysokości PZP.
 3. Przy stosowaniu kilku PZP w strefie 30 prędkości zależą przede wszystkim od rozstawu PZP, sposobu parkowania pojazdów na jezdni, liczby zjazdów i zagospodarowania otoczenia. W strefach 30, w których przewidziane jest parkowanie samochodów na jezdni, powinno się planować naprzemienne pasy postojowe pomiędzy PZP, co przyczyni się do utrzymania właściwych trajektorii ruchu pojazdów w obu kierunkach, bez wjeżdżania na chodniki oraz boczne skosy PZP lub ścieki uliczne.
 4. Podczas projektowania PZP powinno się koniecznie stosować strome boczne skosy i elementy małej architektury (Rys. 8a), które skutecznie pozwolą utrudnić kierowcom przejeżdżanie po skosach lub ściekach ulicznych, a także uniemożliwią niedopuszczalną jazdę po chodnikach. Stosowanie stromych skosów bocznych przyczynia się do korzystania z prawidłowo wyznaczonych korytarzy ruchu pojazdów oraz zapewnia utrzymanie dobrego stanu nawierzchni w całym okresie eksploatacji. Możliwość stosowania przy PZP elementów małej architektury zależy, jednakże od dostępnej szerokości chodnika, co wiąże się bezpośrednio z utrzymaniem obowiązkowej skrajni drogowej i zapewnieniem minimalnej szerokości chodnika dla pieszego.
 5. Na pochyleniach podłużnych jezdni większych niż 2% powinno się stosować w przypadku budowy PZP tylko nawierzchnie z kostki betonowej samoblokującej, które są bardziej odporne na przemieszczenia w rejonie nagromadzenia i nakładania się odwrotnie skierowanych do siebie sił poziomych podczas hamowania i przyspieszania.

contrasting colours, e.g. red and white, should be applied instead of applying paint that is subject to blurring over short time due to a difference in rigidity of both materials.

The obtained conclusions may be helpful at the stage of designing new STs and indicate the need to supplement guidelines currently applicable in Poland in this regard [27].

However, the presented studies are burdened with some limitations resulting from a small number of 30 km/h zones set in our country, in which different sequences of several STs would be applied on long streets with a different configuration and use profile. Moreover, it needs to be noticed that STs are often laid in a very economical manner, i.e. without additional security bollards or others small architecture elements. This has caused the selection of representative 30 km/h zones fit for analysing was more limited.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *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
- [2] Pedestrian safety: a road safety manual for decision-makers and practitioners. World Health Organization, 2013, Geneva, Switzerland, https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/79753/9789241505352_eng.pdf?sequence=1 (12.05.2025)
- [3] *Pau M.*: Speed bumps may induce improper drivers' behavior: case study in Italy. Journal of Transportation Engineering, **128**, 5, 2002, 472-478, DOI: 10.1061/(ASCE)0733- 947X(2002)128:5(472)
- [4] *D'Apuzzo M., Evangelisti A., Santilli D., Nardoianni S., Cappelli G., Nicolosi V.*: Towards a new design methodology for vertical traffic calming devices. Sustainability, **15**, 18, 2023, Article ID: 13381, DOI: 10.3390/su151813381
- [5] Traffic calming, Local Transport Note 1/07. Department for Transport. The Stationery Office (TSO), London, UK, 2007
- [6] Directives for the design of urban roads RAS 06. Road and Transportation Research Association, Köln, Germany, 2012
- [7] Urban Traffic Areas – Part 7 – Speed Reducers. Vejdirektoratet-Vejreguludvalget: Copenhagen, Denmark, 1991
- [8] *Hummel T., Archie Mackie A., Wells P.*: Traffic calming measures in built-up areas - Literature Review. Unpublished Project Report PR/SE/622/02, Swedish National Road Administration, Borlänge, Sweden, 2002, <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=7872af0d-cbfadb393f97d5f17f904670e83ec4> (12.05.2025)
- [9] Traffic Management Guidelines. Government Publications Sale Office, Sun Alliance House, Dublin, Ireland, 2014, https://www.rmo.ie/uploads/8/2/1/0/821068/dto_traffic_manual.pdf (12.05.2025)
- [10] Home Zone Design Guidelines. Institute of Highway Incorporated Engineers, HQ Design & Print: Essex, UK, 2002
- [11] *Janssens I., Chalanton I., Bertrand P.J., Caelen E., Broeckaert M., Dullaert I., Englebin Y., Houdmont A., Mathieu V., Temmerman P.*, et al.: Het (Woon) Erf. Brochure ter Attentie van de Weg Beheerders. Belgisch Instituut voor de Verkeersveiligheid (BIVV), Brussel, Belgium, 2013, https://brulocalis.brussels/sites/default/files/2022-12/web_2013_zr_nl.pdf (12.05.2025)
- [12] Woonerven. MENS en STRAAT, Delft, The Netherlands, 2018, <https://mensenstraat.nl/inspiratie/woonerven/> (12.05.2025)
- [13] Touring Club Schweiz TCS: Sicherheit in den Quartieren, Eine Informationsschrift über Strassengestaltung und Verkehrsmassnahmen. TCS CHF 10, Touring Club Schweiz Verkehrssicherheit, Vernier, Switzerland, 2002
- [14] 30 km/h zones. Institut for Road Safety Research (SWOV), Haag, The Netherlands, 2018, <https://swov.nl/en/fact-sheet/30-kmh-zones> (12.05.2025)
- [15] Wirksamkeit geschwindigkeitsdämpfender Maßnahmen ausserorts. Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrsweisen: Hessen, Germany 1997 (available from the authors)
6. Do budowy PZP powinno się wykorzystywać kostki betonowe koloru czerwonego, które są bardziej widoczne dla kierowcy nawet w okresie zmniejszonej widoczności. Na rampach powinno się stosować kostki w kontrastowych kolorach: czerwonym i białym, zamiast stosowania farb, które w krótkim czasie ulegają starciu, ze względu na różnicę sztywności obu materiałów.

Otrzymane wnioski mogą być pomocne na etapie projektowania nowych PZP i wskazują na konieczność uzupełnienia w tym zakresie wytycznych obowiązujących aktualnie w Polsce [27].

Przedstawione badania mają jednak pewne ograniczenia, wynikające z faktu małej liczby wyznaczonych w naszym kraju stref 30, w których na długich ulicach o różnej konfiguracji profilu podłużnego byłyby zastosowane różne sekwencje kilku PZP. Ponadto, należy zauważyć, że PZP budowane są często w bardzo oszczędny sposób, tj. bez dodatkowych słupków lub innych elementów małej architektury. To powodowało, że wybór odpowiednio reprezentatywnych stref 30 nadających się do prowadzenia badań był bardziej ograniczony.

- [16] Antić B., Dalibor Pešić D., Vujanić M., Lipovac K.: The influence of speed bumps heights to the decrease of the vehicle speed – Belgrade experience. *Safety Science*, **57**, 2013, 303-312, DOI: 10.1016/j.ssci.2013.03.008
- [17] Bjarnason S.: Round top and flat top humps – The influence of design on the effects. Thesis dissertation 125, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, 2004
- [18] Majer S., Sołowczuk A., Kurnatowski M.: Design and construction aspects of concrete block paved vertical traffic-calming devices located in home zone areas. *Sustainability*, **16**, 7, 2024, Article ID: 2982, DOI: 10.3390/su16072982
- [19] Majer S., Sołowczuk A.: Effectiveness of a series of road humps on home zone streets: A case study. *Sustainability*, **17**, 2, 2025, Article ID: 644. DOI: 10.3390/su17020644
- [20] 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, Article ID: 7880, DOI: 10.3390/su15107880
- [21] Pérez-Acebo H., Ziolkowski R., Linares-Unamunzaga A., Gonzalo-Orden H.: A series of vertical deflections, a promising traffic calming measure: analysis and recommendations for spacing. *Applied Sciences*, **10**, 10, 2020, Article ID: 3368, DOI: 10.3390/app10103368
- [22] Loprencipe G., Moretti L., Pantuso A., Banfi E.: Raised pedestrian crossings: Analysis of their characteristics on a road network and geometric sizing proposal. *Applied Sciences*, **9**, 14, 2019, Article ID: 2844, DOI: 10.3390/app9142844
- [23] Sharma S.D.: Interlocking concrete paver blocks An easy approach for road construction. *Infra Development & Const. Equipment Magazine (NBM&CW)*, 2009, <https://www.nbmccw.com/product-technology/construction-chemicals-waterproofing/concrete-admixtures/interlocking-concrete-paver-blocks.html> (10.06.2024)
- [24] Jateikiene L., Andriejauskas T., Lingytė I., Jasiuniene V.: Impact assessment of speed calming measures on road safety. *Transportation Research Procedia*, **14**, 2016, 4228-4236, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.394
- [25] Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych (WPSD). Część I: Skrzyżowania zwykłe i skanalizowane. GDDP, Warszawa, 2001
- [26] Bohatkiewicz J., Biernacki S., Drach M., Kozłowski D., Nowak P.: Zasady uspokajania ruchu na drogach za pomocą fizycznych środków technicznych. Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa, 2008
- [27] Szczegółowe warunki techniczne dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunki ich umieszczania na drogach. Załącznik do Dziennika Ustaw nr 220 poz. 2181 z dnia 23.12.2003 z późn. zm.
- [28] Majer S.: Strefa zamieszkania – po 20 latach eksploatacji. *Przegląd Komunikacyjny*, **LXXIX**, 4-5, 2024, 3-12
- [29] Majer S., Sołowczuk A.: Dobre praktyki projektowania progów zwalniających. *Drogi Samorządowe*, **77**, 11-12, 2024, 28-38
- [30] Garilli E., Autelitano F., Roncella R., Giuliani F.: The influence of laying patterns on the behaviour of historic stone pavements subjected to horizontal loads. *Construction and Building Materials*, **258**, 2020, Article ID: 119657, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119657
- [31] Autelitano F., Garilli E., Giuliani F.: Criteria for the selection and design of joints for street pavements in natural stone. *Construction and Building Materials*, **259**, 2020, Article ID: 119722, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119722
- [32] Hengl H.L., Kluger-Eigl W., Lukacevic M., Blab R., Füssl J.: Horizontal deformation resistance of paving block superstructures – Influence of paving block type, laying pattern, and joint behaviour. *International Journal of Pavement Research and Technology*, **11**, 2018, 846-860, DOI: 10.1016/j.ijprt.2018.08.001
- [33] Lin W., Ryu S., Hao H., Cho Y.: Development of a horizontal shifting mechanistic-empirical prediction model for concrete block pavement. *Construction and Building Materials*, **118**, 2016, 245-255, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.124
- [34] Hidayah N., Md Nor H., Azman M.: Effect of jointing sand sizes and width on horizontal displacement of concrete block pavement. *Jurnal Teknologi*, **71**, 3, 2014, 83-86, DOI: 10.11113/jt.v71.3764
- [35] Mampearachchi W.K., Senadeera A.: Determination of the most effective cement concrete block laying pattern and shape for road pavement based on field performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**, 2, 2014, 226-232, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000801
- [36] Cox D.R., Reid N.: The theory of the design of experiments. *Monographs on Statistics and Applied Probability* 86, Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, London, New York, Washington, 2000, <https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/182-The-Theory-of-the-Design-of-Experiments-D.R.-Cox-N.-Reid-Edisi-1-2000.pdf> (12.05.2025)
- [37] Kamińska J., Chalfen M.: The effect of distances between vehicles on time and speed in simulated traffic flow. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **16**, 3, 2017, 163-176, DOI: 10.7409/rabdim.017.011
- [38] Highway capacity manual. Transportation Research Board (TRB), National Research Council, HCM, Washington, 2000, https://sjnavarro.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/08/highway_capacital_manual.pdf (12.05.2025)
- [39] System Ewidencji Wypadków i Kolizji SEWIK, <https://sewik.pl> (23.01.2024)
- [40] Sołowczuk A., Gardas P.: Effect of the parking lane configuration on vehicle speeds in home zones in Poland. *Sustainability*, **12**, 2, 2020, Article ID: 588, DOI: 10.3390/su12020588

Wnioski porealizacyjne stosowania progów zwalniających płytowych w strefie ruchu uspokojonego

Streszczenie: Jednym z kluczowych zagadnień w zarządzaniu prędkością jest uspokojenie ruchu na obszarach zabudowanych. Polega ono na wprowadzaniu strefy 30 km/h lub stref zamieszkania w obszarach zabudowy wyłącznie mieszkaniowej. W Polsce najczęściej stosuje się pionowe środki uspokojenia ruchu, ze względu na niższe koszty budowy oraz mniejszą zajętość terenu w porównaniu do poziomych środków uspokojenia ruchu. W dostępnej literaturze zaproponowano różne modele wyznaczania prędkości za progiem zwalniającym płytowym (PZP) lub redukcji prędkości, jaką może spowodować dany próg. W większości są to jednak wyniki badań przeprowadzonych w bazach doświadczalnych lub na symulatorach ruchu. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań prędkości przeprowadzone w trzech przykładowych – specjalnie dobranych – obszarach badawczych ze zróżnicowanymi czynnikami wpływu, które projektanci uspokojenia ruchu powinni uwzględniać w projektach PZP. Na podstawie wykonanych pomiarów prędkości wykazano, że na jej redukcję wpływa nie tylko wysokość progu, ale także inne czynniki, takie jak: krzywizny poziome i pionowe, funkcja ulicy, liczba zjazdów na posesje i drogi boczne, zagospodarowanie otoczenia oraz parametry geometryczne PZP. Powyższe ustalenia mogą okazać się pomocne przy planowanych inwestycjach drogowych, tak by PZP były skuteczne i sprzyjały tworzeniu bezpiecznego środowiska miejskiego dla wszystkich użytkowników.

Słowa kluczowe: oznakowanie poziome, progi zwalniające płytowe, redukcja prędkości, stan nawierzchni, uspokojenie ruchu.
