

TOMASZ E. BURGHARDT<sup>1)</sup>BIRGIT KÖCK<sup>2)</sup>ANTON PASHKEVICH<sup>3)</sup>ALEXANDER FASCHING<sup>4)</sup>

## SKID RESISTANCE OF ROAD MARKINGS: LITERATURE REVIEW AND FIELD TEST RESULTS

### SZORSTKOŚĆ DROGOWEGO OZNAKOWANIA POZIOMEGO: PRZEGLĄD LITERATURY I BADANIA TERENOWE

**STRESZCZENIE.** Szorstkość oznakowania poziomego należy do jego najważniejszych parametrów użytkowych, wpływa bowiem znacząco na bezpieczeństwo wszystkich użytkowników drogi, zwłaszcza, gdy nawierzchnia jest mokra. W artykule przedstawiono przegląd nielicznych publikacji poświęconych temu zagadnieniu. Aby zademonstrować wpływ wybranych cząsteczek uszorstniających na wartość wskaźnika wahadła pomiarowego (*PTV*, ang. *Pendulum Test Value*) oznakowania poziomego, przeprowadzono badanie terenowe pięciu materiałów. Podczas gdy wartość *PTV* nawierzchni asfaltowej wynosiła 49, pokrycie jej farbą bez posypki mikrokulek szklanych czy cząsteczek uszorstniających spowodowało spadek *PTV* do 35. Zastosowanie mikrokulek szklanych zapewniło wzrost *PTV* do 45, zaś użycie mieszaniny mikrokulek szklanych z zaledwie 10% korundu przełożyło się na wartość *PTV* równą 50. Osiągnięta początkowa wartość *PTV* oraz jej zachowanie podczas eksploatacji uzależnione były od wyboru cząsteczek uszorstniających: o ile początkowe wartości *PTV* mieściły się w zakresie 45-65, po 10 miesiącach zmierzono spadek do 41-49 (względny spadek o 6-32%). Uzyskane wyniki potwierdziły, że cząsteczki uszorstniające różnią się pod względem skuteczności, a początkowa wartość *PTV* nie pozwala na wiarygodne prognozowanie szorstkości w trakcie używania oznakowania.

**SŁOWA KLUCZOWE:** bezpieczeństwo ruchu drogowego, cząsteczki uszorstniające, farba wodnorozcieńczalna, granulaty szklane, korund, mikrokulki szklane, pierwiastki toksyczne.

**ABSTRACT.** Skid resistance of road markings belongs to their important performance parameters, significantly influencing the safety of all road users, particularly when the roadway is wet – yet it is very seldom addressed. A review of the sparse literature on this topic is provided herein. To demonstrate the effect of the selection of anti-skid particles on Pendulum Test Value (*PTV*) of road markings, a field experiment was done with five drop-on materials. Whereas *PTV* of the asphalt road surface was 49, covering it with a paint without any glass beads or anti-skid particles caused *PTV* decrease to 35; utilisation of glass beads led to an increase in *PTV* to 45 and the use of a mixture of glass beads with 10% of corundum provided *PTV* 50. The achieved initial *PTV* and its retention upon the usage of road markings depended on the selection of the anti-skid particles. The initial *PTV* were in the range of 45-65, after 10 months they decreased to 41-49 (i.e. by 6-32%). The results confirm that not all anti-skid particles are equal and that the initial *PTV* cannot be used to reliably predict long-term performance.

**KEYWORDS:** anti-skid particles, corundum, glass beads, glass granulate, road safety, toxic elements, waterborne paint.

DOI: 10.7409/rabdim.023.007

<sup>1)</sup> M. Swarovski Gesellschaft m.b.H., Wipark, 14. Straße 11, 3363 Neufurth, Austria; tomasz.burghardt@swarco.com

<sup>2)</sup> M. Swarovski Gesellschaft m.b.H., Wipark, 14. Straße 11, 3363 Neufurth, Austria; birgit.koeck@swarco.com

<sup>3)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Polska; anton.pashkevich@pk.edu.pl (✉)

<sup>4)</sup> M. Swarovski Gesellschaft m.b.H., Wipark, 14. Straße 11, 3363 Neufurth, Austria; alexander.fasching@swarco.com

## 1. WPROWADZENIE

Oznakowanie poziome to jeden z podstawowych elementów zapewniających bezpieczeństwo ruchu drogowego. Ułatwia ono kierowcom orientację i organizuje ruch w przekroju drogi [1]. Oznakowanie poziome jest wszechobecne, ponieważ nie istnieje żadna inna technologia mogąca je zastąpić; nawet wizyjne systemy maszynowe stosowane w zaawansowanych systemach wspomaganie kierowcy czy w rozwijanych obecnie pojazdach autonomicznych opierają się w większości na oznakowaniu poziomym [2]. Oznakowanie poziome stanowi wyjątkową odmianę powłok przemysłowych – jest to system dwuwarstwowy, złożony ze spodniej warstwy farby oraz wierzchniej warstwy mikrokulek szklanych nakładanych przez posypywanie [3]. Istnieje wiele rodzajów materiałów nadających się do wykorzystania jako warstwa farby; niektóre z nich nie są technicznie farbami, ale masami polimerowymi lub niepolimerowymi [4]. Oznakowanie dróg podzielić można na cienkowarstwowe, zazwyczaj o grubości nakładanej powłoki poniżej 1 mm (używa się materiałów takich jak farby wodorozcieńczalne czy rozpuszczalnikowe lub natryskiwane masy chemoutwardzalne na zimno albo termoplastyczne), oraz grubowarstwowe (masy chemoutwardzalne na zimno, masy termoplastyczne i taśmy), o grubościach przekraczających 1 mm, a w przypadku oznakowań strukturalnych sięgających nawet 5 mm. Nałożona na warstwę farby warstwa mikrokulek szklanych spełnia kilka funkcji: poprawia widoczność w nocy dzięki retrorefleksyjności [5], chroni położoną pod nią farbę przed ścieraniem [6] oraz poprawia szorstkość oznakowania [7]. W celu dalszego zwiększenia szorstkości, mikrokulki szklane można zmieszać z cząsteczkami uszorstniającymi (ASP, ang. *anti-skid particles*), które czasami zwane są również dodatkami lub kruszywami antypoślizgowymi. Zarówno mikrokulki szklane, jak i ASP można mieszać z farbami nakładanymi grubowarstwowo; takie przypadki nie będą jednak tutaj omawiane ze względu na ich odmienną specyfikę.

Szorstkość poziomego oznakowania drogowego ma ogromne znaczenie praktyczne, jest bowiem bezpośrednio powiązana z bezpieczeństwem ruchu drogowego, zwłaszcza, gdy nawierzchnia jest mokra [8]. Niemniej jednak, problem ten jest rzadko rozpatrywany; zdecydowana większość artykułów związanych z oznakowaniem poziomym poświęcona jest wskaźnikom widoczności [9]. W ostatnich publikacjach autorów, które poświęcone były właściwościom eksploatacyjnym oznakowania poziomego również

## 1. INTRODUCTION

Road markings (RM) are a basic road safety feature, responsible for guiding drivers and organising traffic [1]. They are ubiquitous, since there is no technology that could replace them; even machine vision utilised in advanced driver assistance systems and the emerging technology of automated vehicles mostly rely on RM [2]. RM are a unique kind of industrial maintenance coatings: a dual-layer system comprising the bottom paint layer and the top drop-on glass beads (GB) layer [3]. There are many types of materials that are suitable for the paint layer; technically, some of them are not paints, but polymeric or non-polymeric masses [4]. The materials used for the paint layer can be divided into those designed for application in thin layers, with film builds usually below 1 mm (like water- or solvent-borne paints, sprayed cold plastic or sprayed thermoplastic) and those that are applied as thick layers (cold plastic, thermoplastic, and tapes), with film build thicknesses exceeding 1 mm and – in the cases of structured markings – reaching even 5 mm. The GB layer plays several roles: enhances visibility at night through retroreflection [5], protects the underlying paint layer from abrasion [6], and also improves skid resistance of RM [7]. To further increase the skid resistance of RM, drop-on GB can be intermixed with anti-skid particles (ASP), which are sometimes referred to as anti-skid additives or aggregates. Both the ASP and the GB can also be premixed with the materials that are applied in thick layers; such cases shall not be discussed herein due to their specificity.

Skid resistance of RM is of utmost practical importance due to its association with road safety, particularly on wet surface [8]; however, it is discussed very seldom. Vast majority of articles related to RM concentrate on visual performance indicators [9]. Indeed, in the recent publications by the authors, describing RM performance in the field, *PTV* were not mentioned, even though they were measured, as the authors wanted to maintain the focus on other parameters [10-12].

There is a paucity of data related to skid resistance of RM, and particularly the influence of the choice of ASP on *PTV*. Therefore, to fill this knowledge gap, exemplary ASP types were evaluated in the field side-by-side, applied as drop-on materials on thin-layer RM (a waterborne paint applied at approximately 400  $\mu\text{m}$ ). The testing enabled assessment of their immediate and long-term effectiveness. In addition to reporting the outcome of the evaluation, in this article

nie wspomniano o *PTV* (choć pomierzono je podczas badań), jako że autorzy nie chcieli odwracać uwagi czytelnika od innych omawianych parametrów [10-12].

Dostępne dane dotyczące szorstkości oznakowania poziomego są ubogie, zwłaszcza w odniesieniu do wpływu wyboru cząsteczek uszorstniających na *PTV*. W związku z tym, celem uzupełnienia tej luki w wiedzy, przeprowadzono terenowe badanie porównawcze na kilku przykładowych ASP, nakładając je przez posypywanie na oznakowanie cienkowarstwowe (na farbę wodorozcieńczalną o grubości powłoki około 400  $\mu\text{m}$  na mokro). Badanie umożliwiło ocenę początkowej oraz długoterminowej efektywności ASP. W niniejszym artykule przedstawiono nie tylko wyniki przeprowadzonego badania, ale również przegląd nielicznych pozycji literaturowych związanych z szorstkością oznakowania poziomego. Aby skupić się na badanych czynnikach, za wykraczające poza zakres niniejszej pracy uznano rozważania związane z właściwościami powierzchniowymi warstwy asfaltowej, wpływem warunków atmosferycznych, wpływem materiałów innych niż rozpatrywane w badaniu czy oceną ASP mieszanych z farbami (a nie używanych do posypki). Wyniki przedstawione w artykule mogą zostać wykorzystane przez zarządców dróg chcących poprawić właściwości eksploatacyjne oznakowania poziomego oraz bezpieczeństwo w warunkach mokrej nawierzchni. Wyniki mogą być również użyteczne dla osób odpowiedzialnych za dobór składu materiałów do znakowania oraz dla naukowców badających zagadnienia bezpieczeństwa na drogach. Według wiedzy autorów niniejszy artykuł stanowi pierwszą pracę poświęconą w całości temu ważnemu zagadnieniu praktycznemu, przedstawiającą przy tym porównanie skuteczności różnych cząsteczek uszorstniających.

## 2. INFORMACJE OGÓLNE

### 2.1. PRZEGLĄD LITERATURY

Duże znaczenie utrzymania wysokiej szorstkości nawierzchni drogowej było opisywane i omawiane w licznych artykułach [13-16]. Jednocześnie niewiele uwagi poświęcono w literaturze zagadnieniu szorstkości oznakowania poziomego; autorzy nie znaleźli ani jednej serii raportów czy publikacji z systematycznych badań szorstkości takiego oznakowania – ani w publikacjach recenzowanych, ani w tzw. „szarej literaturze”. Wybrane artykuły wraz z zaprezentowanymi w nich istotnymi wnioskami podsumowano w Tabl. 1.

the scarce literature related to skid resistance of RM is also reviewed. To maintain focus, considerations related to the asphalt surface, the influence of weather conditions, the effects of road marking materials other than tested, and evaluation of premixed ASP were regarded as out of the scope of this work. The results provided herein can be used by road administrators seeking improvement of the performance of RM to enhance road safety under wet conditions may also serve formulators of RM working on the optimum solutions and they can also benefit road safety scientists. To the best of the authors' knowledge, this is the first article specifically addressing this important practical topic while providing a comparison of effectiveness of different ASP.

## 2. BACKGROUND

### 2.1. LITERATURE REVIEW

The importance of maintaining high skid resistance of pavements was described and reviewed in numerous articles [13-16]. In contrast, references to skid resistance of RM remain scarce; no series of publications or reports from systematic testing could be found in either the peer-reviewed publications or in 'grey literature'. Selected articles and major findings reported therein are summarised in Table 1; however, most of them address the issue of ASP choice quite superficially, if at all. The absence of data related to long term performance – with the exception of two reports – is notable. Reports published in foreign languages, inadequately indexed sources, internet sources, and patents were excluded from this review.

One should note some inconsistencies amongst the reports listed in Table 1: for example, while in one study *PTV* of thermoplastic RM were very low [30], another study claimed that the same type of RM was 'the only truly anti-skid RM' [19]. Such contradictory statements are most likely the result of comparing different formulations that utilised dissimilar drop-on and premixed ASP. Additional confusion may be caused by certain reports providing *PTV* without noting whether ASP were used (what kind and what quantity) and for how long the RM were in service. The effect that the surface texture parameters had on skid resistance was briefly addressed [20, 34], but from the perspective of a systematic study of various types of ASP this remains an unexplored area. The difficulty in visual distinguishing in the applied RM the ASP presence and type, particularly after they have been exposed to traffic, should be noted; as such, simple examination in the field may be insufficient.

Table 1. Selected literature related to skid resistance of road markings

Tablica 1. Wybrane pozycje literaturowe związane z szorstkością oznakowania poziomego

Reference Źródło	Discussed topic and major findings / Omówione zagadnienia i główne wnioski
Anderson et al., 1982 [17]	<p>Major comparison of <i>PTV</i> of various RM (39 formulations in total) on asphalt and concrete roadways, with and without GB. Laboratory simulation polishing test was reported as inadequate. No correlation was found between roadway surface macro- or micro-texture and <i>PTV</i>. The types of ASP other than premix GB were neither disclosed nor discussed.</p> <p>Szerokie badanie porównawcze <i>PTV</i> różnych oznakowań (łącznie 39 próbek) na nawierzchniach asfaltowych i betonowych, z mikrokulkami szklanymi oraz bez nich. Stwierdzono, że badania laboratoryjne symulujące ścieranie są niewystarczające. Nie znaleziono korelacji między makro- i mikroteksturą powierzchni jezdni a <i>PTV</i>. Typy ASP inne niż mikrokulki szklane mieszane z farbą nie były wspomniane czy omówione.</p>
Januszke, Richards, 1990 [18]	<p>Evaluation of <i>PTV</i> of RM paint intermixed with quartz (post-added at 0.1-1.5 kg per 1.0 dm<sup>3</sup> of paint). Not only the <i>PTV</i> did increase from 25-30 (paint without any drop-on GB) to 40-45 (as compared to road surface <i>PTV</i> &gt; 50), but the service life was also prolonged. Study of quartz particle sizes revealed that a broad range of sizes (75-425 µm) gave the best results. Neither the service life nor <i>PTV</i> increased considerably when quartz content in paint was above 0.6 kg/dm<sup>3</sup>.</p> <p>Ocena <i>PTV</i> oznakowań z farby zmieszanej z kwarcem (dodanym w ilości 0,1-1,5 kg na 1,0 dm<sup>3</sup> farby). Dodatek kwarcu nie tylko podwyższył <i>PTV</i> z poziomu 25-30 (farba bez mikrokulek szklanych) do 40-45 (pomimo, że czysta powierzchnia jezdni wykazywała <i>PTV</i> &gt; 50), lecz również przedłużył okres eksploatacji. Badanie frakcji cząstek kwarcu wykazało, że najlepsze wyniki zapewnił szeroki zakres rozmiarów (75-425 µm). Gdy zawartość kwarcu w farbie przekroczyła 0,6 kg/dm<sup>3</sup>, nie stwierdzono dalszego istotnego przyrostu <i>PTV</i> ani okresu eksploatacji.</p>
de Witt et al., 2000 [19]	<p>Review of various parameters related to the maintenance of RM at high standard. Differences in the ability of various materials to maintain appropriate skid resistance were measured. Thermoplastic masses were claimed to be the only truly anti-skid RM. Nonetheless, ASP were not mentioned at all.</p> <p>Przegląd różnych parametrów związanych z utrzymaniem oznakowania na wysokim poziomie. Zbadano różnice w zdolności odmiennych materiałów do utrzymywania prawidłowej szorstkości. Stwierdzono, że masy termoplastyczne były jedynym prawdziwie antypoślizgowym oznakowaniem. Nie wspomniano jednak wcale o cząsteczkach uszorstniających.</p>
Harlow, 2005 [8]	<p>Review of proposal for improvement of the local standard in New Zealand; <i>PTV</i> &gt; 45 for thin- and 50-65 for thick-layer RM were noted as desired. Corundum, quartz sand, and silica sand were noted as possible ASP; quantities of 0.20-0.27 kg/m<sup>2</sup> were deemed sufficient for premixed materials and 1:2 mixtures with GB for drop-on materials (intermixing immediately prior to application was recommended). Information about previous efforts in New Zealand was discussed.</p> <p>Omówienie propozycji dotyczących poprawy lokalnej normy w Nowej Zelandii; za pożądane parametry uznano <i>PTV</i> &gt; 45 dla oznakowań cienkowarstwowych oraz 50-65 dla grubowarstwowych. Jako możliwe ASP wymieniono korund, piasek kwarcowy i piasek krzemionkowy. Dla dodatków do farb, ilości 0,20-0,27 kg/m<sup>2</sup> uznano za wystarczające; dla mieszanin ASP z mikrokulkami szklanymi przeznaczonymi do nałożenia przez posypanie zalecono stosunek 1:2 (zalecając mieszanie bezpośrednio przed nałożeniem). Omówiono wcześniejsze prace badawcze w Nowej Zelandii.</p>

Reference Źródło	Discussed topic and major findings / Omówione zagadnienia i główne wnioski
Pasetto, Barbati, 2006 [20]	<p>Measured micro-texture, macro-texture depth, and skid resistance of both RM and the neighbouring roadway surface, at 16 locations in Italy; in all of the cases <i>PTV</i> of the roadway was 4-15 units higher than <i>PTV</i> of the RM (range 41-57). The correlation between surface texture parameters and <i>PTV</i> in the case of paint was established.</p> <p>Pomiary głębokości mikro- i makrotekstury oraz szorstkości oznakowania poziomego i sąsiadujących obszarów jezdni w 16 lokalizacjach we Włoszech. We wszystkich przypadkach szorstkość jezdni była o 4-15 jednostek <i>PTV</i> wyższa niż szorstkość oznakowania (zakres 41-57). Ustalono korelację między parametrami tekstury nawierzchni a <i>PTV</i> oznakowania wykonanego farbą.</p>
Rao et al., 2010 [21]	<p>Described four types of RM specifically designed as anti-skid treatments for larger road surfaces. Bauxite and slag aggregate (a by-product of steel production process) were noted as suitable ASP. The suggested values of <i>PTV</i> were as follows: <i>PTV</i> &gt; 65 for difficult locations (roundabouts, sharp curves, approaches to intersections), <i>PTV</i> &gt; 55 for motorways and major trunk roads, and <i>PTV</i> &gt; 45 for all other roads. Skid resistance of roadway surface and of RM were considered together.</p> <p>Opisano cztery typy oznakowania poziomego zaprojektowanego specjalnie z myślą o zapobieganiu śliskości na większych obszarach znakowania. Za odpowiednie ASP uznano boksyt i kruszywo żuźlowe (produkt uboczny produkcji stali). Sugerowane wartości <i>PTV</i> były następujące: <i>PTV</i> &gt; 65 w trudnych lokalizacjach (ronda, ostre zakręty, dojazdy do skrzyżowań); <i>PTV</i> &gt; 55 dla autostrad i dróg głównych; <i>PTV</i> &gt; 45 dla wszystkich pozostałych dróg. Szorstkość powierzchni jezdni oraz oznakowań poziomych rozpatrywano łącznie.</p>
Karim et al., 2012 [22]	<p>RM based on cold plastic with bauxite as drop-on ASP (followed by application of thin layer of cold plastic) were applied as large-surface markings on approaches to intersections. <i>PTV</i> within the range of 64-81 were measured. A decrease by over 30% was reported for the number of collisions, with 10% reduction in injuries, but there was no reduction in rear-end accidents.</p> <p>Oznakowania poziome z mas chemoutwardzalnych na zimno z posypką z boksytu (wraz z natychmiastowym nałożeniem na wierzch cienkiej warstwy masy chemoutwardzalnej na zimno) zastosowano w charakterze oznakowań dużych powierzchni dojazdów do skrzyżowań. Uzyskano <i>PTV</i> w zakresie 64-81. Stwierdzono spadek liczby kolizji o ponad 30%, ze spadkiem liczby rannych o 10%. Nie stwierdzono spadku liczby zderzeń tylnych.</p>
Pasetto, Barbati, 2013 [23]	<p>Results of <i>PTV</i> changes at 34 locations in Italy over several years were reported. In the majority of cases, <i>PTV</i> were compliant with the set minimum of 45 (for roads with speed limit below 70 km/h) or 50 (for all other roads and motorways). The measured changes in <i>PTV</i> were not systematic – in some cases after the initial major decrease, the values increased, sometimes by more than 10 units. The types of used ASP were not mentioned.</p> <p>Zaprezentowano wyniki zmian <i>PTV</i> w 34 lokalizacjach we Włoszech w okresie kilku lat. W większości przypadków wartość <i>PTV</i> przekraczała wymagane minimum wynoszące 45 (dla dróg z dopuszczalną prędkością poniżej 70 km/h) lub 50 (dla wszystkich pozostałych dróg i autostrad). Zmierzone zmiany <i>PTV</i> nie były systematyczne – w niektórych przypadkach po początkowym znacznym spadku wartości wykazywały wzrost, czasem o ponad 10 jednostek. Nie wymieniono typów zastosowanych ASP.</p>
Asdrubali et al., 2013 [24]	<p>Reported <i>PTV</i> collected at 28 sites in Perugia, Italy. The same lack of consistency as during the other campaign [23] should be noted. <i>PTV</i> varied from 31 to 68; failures were noted in 10 cases in 2010 and in 6 cases in 2012, with only 4 sites being continuously nonconforming (i.e. <i>PTV</i> &lt; 45).</p> <p>Przedstawiono wartości <i>PTV</i> z 28 lokalizacji w Perugii. Należy zauważyć podobny brak spójności wyników jak we wcześniejszych pomiarach [23]. <i>PTV</i> wynosiło od 31 do 68. Stan uniemożliwiający dalszą eksploatację odnotowano w 10 przypadkach w 2010 roku i w 6 przypadkach w 2012 roku, a tylko 4 lokalizacje wykazywały ciągły brak zgodności z wymaganiami (tj. <i>PTV</i> &lt; 45).</p>

Reference Źródło	Discussed topic and major findings / Omówione zagadnienia i główne wnioski
Kajánek, Ondrejka, 2015 [25]	<p>Report describing the functional parameters of pedestrian crossings in Slovakia. Authors noted that drop-on mixtures of GB with ASP were required per homologations, but the ASP were not used in the field (sic!). When paints were used for marking of pedestrian crossings, functional parameters could be lost after less than 2 months.</p> <p>Opracowanie opisujące parametry użytkowe przejść dla pieszych na Słowacji. Autorzy zauważyli, że uzyskanie homologacji wymagało użycia mieszaniny mikrokulek szklanych i ASP nakładanej przez posypanie, lecz ASP nie zastosowano w terenie (sic!). Gdy przejścia dla pieszych znakowano farbą, do utraty właściwości mogło dojść nawet w ciągu 2 miesięcy.</p>
Richard et al., 2015 [26]	<p>In an exploratory work on measuring albedo, <i>PTV</i> were also assessed. <i>PTV</i> of experimental samples from one of the suppliers did not meet the Canadian requirements (<i>PTV</i> 25 was measured); samples furnished by another supplier did meet the norm (<i>PTV</i> &gt; 55; <i>PTV</i> &gt; 65 at curves). No details about the utilised materials were disclosed.</p> <p>We wstępnym badaniu poświęconym pomiarom albedo omówiono również <i>PTV</i>. Wartości <i>PTV</i> próbek badawczych zapewnionych przez jednego z dostawców nie spełniły wymogów kanadyjskich (stwierdzono <i>PTV</i> równe 25); próbki pochodzące od innego dostawcy spełniły wymagania (<i>PTV</i> &gt; 55; na łukach <i>PTV</i> &gt; 65). Nie ujawniono szczegółowych informacji dotyczących zastosowanych materiałów.</p>
Siyahi et al., 2015 [27]	<p>Laboratory tests on cold plastic formulation designed for spraying at thin layer, enhanced with three premixed ASP (glass granulate, silica granules, and expanded clay) that were ground to achieve dimensions less than 75% of the applied film build. The best results were observed for glass granulate: upon its incorporation at the quantity of 10%, <i>PTV</i> increased from 28 to 59; noted were no colour or retroreflectivity deterioration.</p> <p>Badania laboratoryjne masy chemoutwardzalnej na zimno zaprojektowanej z myślą o natryskiwaniu cienką warstwą, wzbogaconej trzema różnymi ASP domieszanymi przed nakładaniem (granulat szklany, granulat krzemionkowy, keramzyt), które uprzednio zmielono do rozmiarów nieprzekraczających 75% zakładanej grubości powłoki. Najlepsze wyniki zaobserwowano dla granulatu szklanego: po jego zastosowaniu w ilości 10% wartość <i>PTV</i> wzrosła z 28 do 59; nie stwierdzono pogorszenia barwy ani odblaskowości.</p>
Kozak et al., 2018 [28]	<p>Acoustic properties were measured for thin-layer RM with high quantity of bauxite as ASP, applied in the Czech Republic as warning markings for dangerous areas approach. No significant increase in noise was measured. <i>PTV</i> were not reported.</p> <p>Zmierzono parametry akustyczne cienkowarstwowego oznakowania poziomego z dużą ilością boksytu w charakterze ASP. Oznakowanie było zastosowane w Czechach jako poziome znaki ostrzegawcze na dojazdach do miejsc niebezpiecznych. Nie stwierdzono istotnego wzrostu hałasu. Nie przedstawiono wartości <i>PTV</i>.</p>
Naidoo, Steyn, 2018 [29]	<p>Laboratory testing of properties of paints and thermoplastic RM used in South Africa. Only thermoplastic applied at the thickness of 1.2 mm had <i>PTV</i> &gt; 50 and thus fulfilled the specifications. No reports on the presence and type of ASP or results from field measurements.</p> <p>Badania laboratoryjne farb i mas termoplastycznych stosowanych w Republice Południowej Afryki. Tylko masy termoplastyczne o grubości 1,2 mm miały <i>PTV</i> &gt; 50 i spełniały specyfikacje. Nie przedstawiono informacji o obecności czy rodzaju ASP ani o wynikach pomiarów terenowych.</p>

Reference Źródło	Discussed topic and major findings / Omówione zagadnienia i główne wnioski
Nassiri et al., 2018 [30]	<p>Report from laboratory and field evaluation of skid resistance of waterborne paint, thermoplastic, and tape applied on concrete surface; evaluation of bicycle stability was included. Conditions of testing included not only wet, but also dry and icy surface. The approximate <i>PTV</i> in the field were 60 for tape, 45 for paint, and 40 for thermoplastic; higher values were measured under laboratory conditions. A questionnaire was addressed to bicycle riders: they subjectively reported feeling the slipperiness of RM only when the surface was wet (it was not reported to which material and <i>PTV</i> the responses applied).</p> <p>Raport z badań laboratoryjnych i terenowych szorstkości oznakowań z farby wodorozcieńczalnej, masy termoplastycznej oraz taśm zastosowanych na nawierzchni betonowej. Uwzględniono ocenę stateczności rowerów. Badania prowadzono nie tylko na powierzchniach mokrych, ale również na suchych i oblodzonych. Przybliżone wartości <i>PTV</i> w terenie wyniosły 60 dla taśmy, 45 dla farby i 40 dla masy termoplastycznej; w warunkach laboratoryjnych zmierzono wyższe wartości. Do rowerzystów skierowano kwestionariusz, w którym wyrazili oni subiektywne odczucie śliskości oznakowania gdy było ono mokre (nie podano, do jakiego materiału i wartości <i>PTV</i> odnosiły się odpowiedzi).</p>
Coves-Campos et al., 2018 [31]	<p>A first of its kind systematic field evaluation of two types of ASP in Spain: non-transparent white marble sand and transparent sodium calcite glass granulate, added at 20% to drop-on GB used to reflectorise a styrene-acrylic waterborne paint (transverse lines were applied). In most cases, a decrease in <i>PTV</i> below the critical value of 45 units was noted within 18 months. While marble provided higher <i>PTV</i> than the glass granulate, its drawback was somewhat lower retroreflectivity.</p> <p>Pierwsza tego rodzaju systematyczna ocena terenowa w Hiszpanii dwóch rodzajów ASP: nieprzezroczystego białego piasku marmurowego oraz przezroczystego granulatu ze szkła sodowego. ASP były dodawane w ilości 20% do mikrokulek szklanych przeznaczonych do nakładania przez posypywanie, które miały zapewnić odblaskowość wodorozcieńczalnej farby styrenowo-akrylowej (nałożono linie poprzeczne). W większości przypadków odnotowano spadek <i>PTV</i> poniżej krytycznej wartości 45 jednostek w ciągu 18 miesięcy. O ile marmur zapewnił wyższe <i>PTV</i> niż granulaty szklane, jego wadą była nieco niższa zmierzona odblaskowość.</p>
Hadizadeh et al., 2020 [32]	<p>Mixture experimental design was employed to optimise the properties of cold plastic RM under laboratory conditions. Two ASP were tested (undisclosed, labelled only as silica aggregates, differing in particle size ranges), each added at the quantity of 10-15% as premix materials; <i>PTV</i> within the range of 48-74 was reached.</p> <p>Zastosowano metodę doświadczalnego projektowania składu celem optymalizacji w warunkach laboratoryjnych właściwości masy chemoutwardzalnych na zimno. Badano dwa rodzaje ASP (nieujawnione, oznaczone jako kruszywa krzemionkowe o różnych frakcjach) dodawane w ilości 10-15% przed nakładaniem masy. Osiągnięto <i>PTV</i> w zakresie 48-74.</p>
Purohit et al., 2020 [33]	<p>Measured <i>PTV</i> of preformed thermoplastic RM applied in the United Kingdom. <i>PTV</i> within the range of 66-73 was recorded. No information about ASP provided, apart from the fact that it included premix glass granulate.</p> <p>Zmierzono <i>PTV</i> prefabrykowanych elementów termoplastycznych stosowanych w Wielkiej Brytanii. Stwierdzono <i>PTV</i> w zakresie 66-73. Brak informacji o ASP – poza faktem, że w składzie znajdował się domieszany wcześniej granulaty szklane.</p>

Warto zauważyć, że w większości z nich dość pobieżnie – jeśli w ogóle – omówiono zagadnienie doboru ASP. Uwagę zwraca także brak danych (z wyjątkiem dwóch artykułów) związanych z właściwościami długoterminowymi. W zaprezentowanym przeglądzie nie uwzględniono doniesień publikowanych w językach obcych, ze źródeł niedostatecznie indeksowanych, źródeł internetowych ani patentów.

Należy zwrócić uwagę na pewne niespójności między pracami wspomnianymi w Tabl. 1. Na przykład, podczas gdy w jednym badaniu wartości *PTV* oznakowania z mas termoplastycznych były bardzo niskie [30], w innym artykule pojawia się stwierdzenie, jakoby właśnie ten typ oznakowania był „jedynym prawdziwie antypoślizgowym oznakowaniem” [19]. Takie sprzeczne stwierdzenia biorą się najprawdopodobniej z porównywania materiałów o różnych składach, z różnymi cząsteczkami ASP nakładanymi przez posypywanie lub mieszanymi z masami termoplastycznymi przed jej nałożeniem. Źródłem dodatkowych niejasności mogą być pewne publikacje, w których przedstawiono wartości *PTV* bez podania informacji, czy stosowane były ASP (jakie i w jakiej ilości) oraz jak długi był okres eksploatacji oznakowania. Pokróćce odniesiono się do związku między parametrami tekstury powierzchni drogi a szorstkością oznakowania [20, 34], jednakże nie przeprowadzono systematycznych badań różnych typów ASP. Należy zauważyć, że pewnych trudności nastręcza wizualna identyfikacja rodzaju ASP czy wręcz samo stwierdzenie ich obecności w oznakowaniu, zwłaszcza jeśli oznakowanie było już narażone na oddziaływanie ruchu. W związku z tym proste oględziny w terenie mogą nie być wystarczające. Wszystkie powyższe niewiadome jedynie potwierdzają potrzebę przeprowadzenia metodycznej analizy szorstkości oznakowania poziomego – próbę dokonania takiej analizy podjęto w niniejszym artykule.

Niestety, liczbowe wyrażenie wpływu utrzymania odpowiedniej szorstkości oznakowania na bezpieczeństwo na drogach jest niemożliwe ze względu na brak niezbędnych danych; zazwyczaj informacje o poślizgach na powierzchni drogi i na oznakowaniu poziomym są rejestrowane łącznie – o ile w ogóle traktuje się je jako czynniki wpływające na wypadki. Niemniej jednak w pewnym stopniu można odnieść się do tego braku w sposób pośredni: dostępne źródła w sposób dość spójny wskazują na korelację między wzrostem wypadkowości a obniżeniem szorstkości powierzchni drogi [35-37] – a zatem, jako że oznakowanie stanowi nieodłączną część infrastruktury drogowej, wyjąt-

All of these unknowns only emphasise the need for a systematic study of skid resistance of RM, which was attempted herein.

Unfortunately, quantification of the safety effects of maintaining RM at appropriate skid resistance is impossible due to the lack of the necessary data; most often the information of slips on roadway surface and slips on RM are bundled together, if at all reported as contributing to accidents. However, this uncertainty can be partially addressed in an indirect manner: the available assessments quite consistently correlate increased accident rates with lower skid resistance of roadway surface [35-37] – hence, because RM are an inseparable part of the road infrastructure, it is extremely unlikely that they would not play any role. Indeed, installation of anti-skid surface markings was reported to considerably decrease collisions [22]. Furthermore, in the light of consistent reports that for elderly pedestrians the risk of slipping belongs to the key mobility factors [38], pedestrian crossings with high skid resistance could contribute to an increase in their life quality. Surprising is the absence of data regarding bicycle and motorcycle stability on such surfaces, except for one report where subjective bicycle stability was assessed [30]. Evaluation of bicycle stability on RM with various structures can be treated as related; interestingly, no statistically significant effects of the *PTV* (ranging from 41 to 91 units) was calculated [39].

## 2.2. SKID RESISTANCE STANDARDS

In Europe, the standard EN 1436 specifies six classes of skid resistance for RM [40]. They vary from *S0* (*PTV* < 45 or impossible to measure) to *S5* (*PTV* ≥ 65). Based on professional experience, for majority of longitudinal RM, class *S1* (*PTV* ≥ 45) is sufficient, while class *S2* (*PTV* ≥ 50) and occasionally class *S3* (*PTV* ≥ 55) are deemed appropriate for pedestrian crossings and for bicycle paths. Classes *S4* (*PTV* ≥ 60) and *S5* (*PTV* ≥ 65) are requested rarely and only for special applications, like race tracks. For the majority of practical applications, *PTV* classes higher than *S2* for longitudinal lines or *S3* for special locations appear unreasonable, because simultaneous obtaining of high retroreflection and high *PTV* is almost impossible unless one uses premium road marking solutions; discussion of this interesting issue is beyond the scope of this report.



kowo mało prawdopodobne jest, aby jego szorstkość nie miała znaczenia. Co więcej, z dostępnych doniesień wynika, że stosowanie oznakowań antypoślizgowych wpływało na zmniejszenie liczby kolizji [22]. Biorąc dodatkowo pod uwagę konsekwentnie notowane w literaturze doniesienia, że ryzyko poślizgnięcia stanowi jeden z głównych czynników wpływających na mobilność pieszych w podszłym wieku [38], można założyć, iż przejścia dla pieszych oznakowane materiałami o wysokiej szorstkości podniosą jakość życia użytkowników. Zaskakujący jest brak danych o stateczności rowerów i motocykli na takich powierzchniach – wyjątek stanowi jedno badanie, w którym analizowano subiektywny odbiór stateczności przez rowerzystów [30]. Jako związaną z tematem można traktować również ocenę stateczności rowerów na oznakowaniach poziomych o różnej strukturze; nie stwierdzono jednak istotnego statystycznie wpływu *PTV* (w zakresie od 41 do 91) [39].

## 2.2. NORMY DOTYCZĄCE SZORSTKOŚCI OZNAKOWANIA

W Europie norma EN 1436 określa sześć klas szorstkości oznakowania poziomego [40]: od klasy *S0* ( $PTV < 45$  lub niemożliwa do zmierzenia) do *S5* ( $PTV \geq 65$ ). Na podstawie doświadczenia inżynierskiego można uznać, że dla większości linii podłużnych wystarczająca jest klasa *S1* ( $PTV \geq 45$ ), zaś w przypadku przejść dla pieszych czy przejazdów dróg dla rowerów wystarczająca jest klasa *S2* ( $PTV \geq 50$ ) lub, w niektórych rzadkich przypadkach, *S3* ( $PTV \geq 55$ ). Klasy *S4* ( $PTV \geq 60$ ) oraz *S5* ( $PTV \geq 65$ ) są wymagane rzadko i jedynie w specjalnych zastosowaniach, takich jak tory wyścigowe. W większości zastosowań praktycznych dążenie do osiągnięcia klasy *PTV* wyższej niż *S2* dla linii podłużnych lub *S3* w specjalnych lokalizacjach wydaje się nieuzasadnione, jako że jednoczesne osiągnięcie wysokiej odblaskowości oraz wysokiej wartości *PTV* jest w zasadzie niemożliwe bez zastosowania oznakowań najwyższej klasy – omówienie tego interesującego zagadnienia nie należy jednak do zakresu niniejszego artykułu.

Potrzebny sprzęt oraz procedury pomiaru szorstkości opisane są szczegółowo w normie EN 13036-4 [41]; równoważna procedura zawarta jest w normie ASTM E 303 [42]. Bezwymiarowe wartości szorstkości określa się z zastosowaniem tzw. wahadła angielskiego (SRT, ang. *British Pendulum Skid Resistance Tester*); parametr ten nazywa się zazwyczaj *PTV*, rzadziej *BPN* (ang. *British Pendulum Number*) lub po prostu SRT. Przyrząd oraz procedurę badania opracowano tak, aby zasymulować poślizg (hamo-

The equipment and procedures for measurement of skid resistance are described in detail in the standard EN 13036-4 [41]; equivalent procedure can be found in the standard ASTM E 303 [42]. The unitless values of skid resistance are to be obtained with the British Pendulum Skid Resistance Tester (SRT); they are referred to as Pendulum Test Values (*PTV*), even though sometimes they are called British Pendulum numbers (*BPN*) or simply SRT values. The equipment and test protocol are designed to imitate a patterned car tyre slipping (braking with blocked wheels) on a wet surface at the speed of 50 km/h. In most European countries RM must meet specifications related to skid resistance; for example, in Poland they are defined in a ministerial ordinance [43] and in Austria in the standard ONR 22441 [44]. The requirements often vary depending on the class of road or location of the RM, but generally class *S1* ( $PTV \geq 45$ ) is demanded, rarely class *S2* ( $PTV \geq 50$ ). In contrast, skid resistance is not generally required in the relevant North American federal standard [45], even if some local specifications may require it. This absence of requirements, along with standards based on composition and not on performance, may be one of the reasons for this topic being generally ignored by North American researchers. Since excessive slipperiness is mostly associated with wet surface, it is important to note that the testing with SRT is to be done on surface that was flooded with water.

Even though the *SRT* was developed and tested in the early 1960s [46], extensive theoretical background was described only recently [47]. The correlation between friction of the tested surface and the measured *PTV* clearly indicated that the obtained values should be treated as an engineering quantity and not a purely empirical index; this is reflected in the standard EN 13036-4 [41], where *PTV* is defined as the loss of energy as the standard rubber-coated slider assembly slides across the test surface and thus provides a standardised value of skid resistance. The SRT device is very sensitive to positioning and requires accurate calibration for repeatability and reliable results; round-robin evaluations showed differences of approximately 5% [48]. A recent assessment of SRT calibration provided alarming results – the reported possibility of discrepancy reached even 60% when equipment calibration was done according to the procedure described in the standard ASTM E 303 and 25% when it was done per the standard EN 13036-4 [49, 50]. Consequently, harmonisation methods were

wanie z zablokowanymi kołami) opony bieżnikowanej po mokrej powierzchni przy prędkości 50 km/h. W większości krajów europejskich oznakowanie poziome musi spełnić wymagania dotyczące szorstkości; na przykład w Polsce wymagania określa rozporządzenie ministra [43], zaś w Austrii norma ONR 22441 [44]. Wymagania często różnią się w zależności od klasy drogi i lokalizacji oznakowania; generalnie wymagana jest klasa *S1* ( $PTV \geq 45$ ), rzadziej *S2* ( $PTV \geq 50$ ). W odróżnieniu od realiów europejskich, odpowiednia północnoamerykańska norma federalna [45] nie określa ogólnych wymagań dotyczących szorstkości – parametr ten może być natomiast wymagany w lokalnych specyfikacjach. Wspomniany brak ogólnokrajowych wymagań – w połączeniu z normami opartymi na składzie materiałowym, nie zaś na właściwościach eksploatacyjnych – może być jedną z przyczyn względnego braku zainteresowania amerykańskich badaczy tematem szorstkości oznakowania poziomego. Należy podkreślić, że badanie ma być wykonywane na mokrej powierzchni, jako że śliskość jest zazwyczaj związana z wilgotnością.

Chociaż urządzenie SRT opracowano i przetestowano już na początku lat 60. ubiegłego wieku [46], szerokiego opisu teoretycznego dokonano dopiero niedawno [47]. Korelacja między szorstkością badanej powierzchni a uzyskaną wartością *PTV* wyraźnie wskazuje, że uzyskane wartości powinny być traktowane jako parametr inżynierski, a nie jako wskaźnik czysto empiryczny. Znajduje to odzwierciedlenie w normie EN 13036-4 [41], gdzie *PTV* zdefiniowano jako utratę energii podczas poślizgu znormalizowanego podgumowanego zestawu pomiarowego po badanej powierzchni – a zatem szorstkość jest wielkością ustandaryzowaną. Urządzenie SRT jest bardzo czułe na ułożenie podczas pracy i wymaga dokładnej kalibracji w celu zapewnienia powtarzalnych i wiarygodnych wyników; badania porównawcze typu każdy-z-każdym (ang. *round robin*) wykazały różnice rzędu 5% [48]. Opublikowane niedawno analizy kalibracji SRT zawierają niepokojące wyniki – stwierdzone prawdopodobieństwo rozbieżności sięgnęło 60% w przypadku procedury kalibracji zgodnej z normą ASTM E 303 oraz 25% w przypadku procedury kalibracji według normy EN 13036-4 [49, 50]. W związku z powyższym opracowano metody harmonizacji, mające zminimalizować takie odchylenia [51]. Według symulacji metodą Monte Carlo niepewność kalibracji nie powinna przekraczać 2,8% [52]. Z praktycznego punktu widzenia należy podkreślić, że dokładność pomiarów SRT zależy od pozycji wahadła.

developed to minimise such deviations [51]. According to Monte Carlo simulation, the calibration uncertainty should not exceed 2.8% [52]. From practical perspective, one should never forget that the accuracy of measurements obtained with SRT depends on the positioning of the pendulum. Hence, while the differences and standard deviations within-test are usually very small, they may differ significantly when one compares different equipment and evaluation is done by different users. Based solely on professional experience and the typically measured ranges, the reported accuracy of 5% [48] in the field conditions equals  $\pm 2$  units of *PTV* when RM are measured.

A significant weakness of the SRT device is that it cannot be reliably used on structured RM. Hence, the use of dynamic testing equipment, which measures much larger surface than SRT, may be advantageous; in the standard EN 1436 the use of such alternative equipment during field measurements is permitted when necessary, but the possibility of high uncertainty is noted. The disadvantage of the majority of alternative equipment is performing the measurements on dry surface, so the results are not necessarily representative of the worst-case scenario and direct comparisons with *PTV* are impossible. Nonetheless, results of evaluation of such dynamic testing equipment were reported in Sweden [53] and Germany [54-56]. Correlation between the results from SRT and one of the dynamic meters was also established [57], albeit reports on further exploration and confirmation of the results could not be found. Various equipment used for skid resistance testing was reviewed and described [58, 59]; while RM were mentioned, the majority of the attention was given to testing of the roadway surface.

### 2.3. ANTI-SKID PARTICLES

Specifications for the drop-on GB and ASP are provided in the standard EN 1423 [60]. In the standard, specific materials are not required, but size ranges, resistance to fragmentation, pH, permitted levels of selected toxic elements, and colour are specified. All ASP are classified as transparent or opaque; the colour of the opaque materials is defined through chromaticity coordinates corresponding to white paint with the demanded luminance factor  $\beta$  higher than 0.70. Therefore, the colour requirements limit the use of some highly effective materials. An image of commercially available GB mixed with 20% of opaque ASP is shown in Fig. 1. A Scanning Electron Microscope (SEM)

W związku z tym, o ile różnice i odchylenia standardowe w obrębie jednego badania są zazwyczaj niskie, mogą one okazać się dużo wyższe, gdy dokona się porównania badań wykonanych różnymi egzemplarzami urządzenia lub przeprowadzonych przez różnych użytkowników. Na podstawie samego doświadczenia inżynierskiego oraz zazwyczaj uzyskiwanych zakresów wyników można stwierdzić, że odnotowana dokładność 5% [48] w warunkach terenowych przekłada się na różnicę  $\pm 2$  jednostek *PTV* przy pomiarach przeprowadzanych na oznakowaniu poziomym.

Istotną wadą urządzenia SRT jest fakt, że nie można dokonać nim wiarygodnych pomiarów szorstkości znakowań strukturalnych. W związku z tym bardziej korzystne może okazać się zastosowanie urządzeń dynamicznych, które obejmują pomiarem znacznie większą powierzchnię niż SRT. Norma EN 1436 pozwala w razie konieczności na użycie takiego alternatywnego sprzętu podczas pomiarów terenowych, zwraca jednak uwagę na możliwość dużej niepewności wyników. Wadę większości metod alternatywnych stanowi dokonywanie pomiarów na suchej powierzchni – w związku z tym wyniki niekoniecznie muszą odzwierciedlać najbardziej niekorzystny przypadek, a bezpośrednio porównania z wartościami *PTV* nie są możliwe. Niemniej jednak, wyniki oceny urządzeń do badań dynamicznych opublikowano w Szwecji [53] i w Niemczech [54-56]. Ustalono również korelację między wynikami SRT a wynikami z jednego z aparatów dynamicznych [57], jednakże autorom nie udało się znaleźć dalszych doniesień z pogłębionych analiz ani weryfikacji wyników. W literaturze pojawiały się omówienia i opisy różnych urządzeń do pomiarów szorstkości [58, 59]; chociaż oznakowanie poziome bywało wzmiankowane, publikacje te były poświęcone przede wszystkim pomiarom szorstkości nieoznakowanej powierzchni jezdni.

### 2.3. CZĄSTECZKI USZORSTNIAJĄCE

Specyfikacje nakładanych przez posypywanie mikrokulek szklanych i cząsteczek uszorstniających podano w normie EN 1423 [60]. Norma określa przedziały ich rozmiarów, odporność na kruszenie, pH, dopuszczalne poziomy zawartości wybranych pierwiastków toksycznych oraz barwę. Choć norma nie określa konkretnych wymaganych materiałów, które miałyby być używane jako ASP, są one wszystkie klasyfikowane jako przezroczyste lub nieprzezroczyste; barwa materiałów nieprzezroczystych jest definiowana za pomocą współrzędnych chromatyczności

image of corundum, a transparent ASP, under 120 $\times$  magnifications is shown in Fig. 2. All other ASP have similar external appearance: sharp edges and rough surface.

## 3. METHODOLOGY AND MATERIALS

### 3.1. TESTED MATERIALS

The materials used for the drop-on layer are briefly described in Table 2. Bauxite was included as a material that provided very high *PTV* in previous tests (Cf. Table 1), even though it does not meet the colour requirements set in the standard EN 1423.

The contents of lead, antimony, and arsenic of the evaluated materials are presented in Table 3. They were measured due to the reports that contamination had been found in some imported GB [61, 62]. Analyses were done according to the procedure described in the Australian standard AP-S0042 [63], using inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP-MS). The absence of these toxic elements in the analysed samples confirmed both the prior reports by the authors [64, 65] and the outcome of an external investigation of GB collected in the field [66]: the drop-on materials manufactured and used in Europe were not contaminated and only a local issue was described in the previous alarming reports.

### 3.2. FIELD TEST

Testing of RM is always burdened with high uncertainty due to the variations of conditions and a plethora of factors that affect the performance. While laboratory evaluation is a valuable procedure, it can be treated as providing too idealised conditions; hence, testing was done in the field, even though this could have been associated with additional uncontrollable factors. To accelerate the wear of RM, they were applied as transverse stripes, with all of the vehicles traveling the particular road section encroaching on them, which is a valid evaluation protocol [31, 67]. The test site was located at a two-way two-lane road in an industrial area, with asphalt surface in good condition (roughness of the surface was not measured). The traffic each workday was approximately 400 lorries, mostly articulated, and around 200 passenger cars, all moving at low speeds. Because heavy vehicles cause more significant damage to the road surface than light ones [68], the obtained exposure was sufficient to imitate the conditions at the most used areas of typical longitudinal line markings quite quickly in spite of the apparently low

odpowiadających farbie białej, z wymaganym współczynnikiem luminancji  $\beta$  powyżej 0,70. Wymagania dotyczące barwy ograniczają więc możliwość zastosowania niektórych wysoce skutecznych materiałów. Zdjęcie dostępnych na rynku mikrokulek szklanych zmieszanych z 20% nieprzezroczystych cząsteczek uszorstniających pokazano na Rys. 1. Obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) przedstawiający korund – przezroczyste cząsteczki uszorstniające – w powiększeniu 120 $\times$  pokazano na Rys. 2. Wszystkie pozostałe cząsteczki uszorstniające mają podobny wygląd zewnętrzny: ostre krawędzie i szorstkie powierzchnie.

### 3. METODOLOGIA I MATERIAŁY

#### 3.1. BADANE MATERIAŁY

Materiały zastosowane w warstwie nakładanej przez posypywanie opisano pokrótce w Tabl. 2. Boksyt włączono do badań jako materiał, który zapewnił bardzo wysoką wartość *PTV* w poprzednich testach (Tabl. 1), chociaż nie spełnia on wymogów normy EN 1423 dotyczących barwy.

Zawartość ołowiu, antymonu i arsenu w ocenianych materiałach przedstawiono w Tabl. 3. Zostały one określone w związku z wcześniejszymi doniesieniami o zanieczyszczeniach stwierdzonych w niektórych importowanych mikrokulkach szklanych [61, 62]. Analiz dokonano zgodnie z procedurą opisaną w normie australijskiej AP-S0042 [63], stosując spektrometrię mas sprzężoną z plazmą wzbudzaną indukcyjnie (ICP-MS). Brak tych niepożądanych pierwiastków w analizowanych próbkach potwierdza zarówno wcześniejsze prace autorów [64, 65], jak i wyniki zewnętrznego badania mikrokulek szklanych pobranych w terenie [66]: produkowane i stosowane w Europie materiały do nakładania przez posypywanie nie były zanieczyszczone, a wcześniejsze niepokojące doniesienia dotyczyły wyłącznie lokalnych problemów.

#### 3.2. BADANIE TERENOWE

Badania oznakowania poziomego są zawsze obarczone dużą niepewnością ze względu na zmienność warunków oraz rozliczne czynniki wpływające na właściwości eksploatacyjne. O ile ocena laboratoryjna stanowi przydatną procedurę, odbywa się ona w zbytnio wyidealizowanych warunkach; w związku z tym niniejsze badania przeprowadzono w terenie, pomimo możliwości pojawienia się dodatkowych czynników niepodlegających kontroli. Aby

traffic load. Even though the data is provided in the time scale, the number of vehicle passes can be conveniently calculated for fair comparison with different test fields; in this case one can estimate that the number of vehicles that crossed each transverse line during the 10 months of exposure was 0.12 million regular passes or 0.68 million weight-adjusted passes.

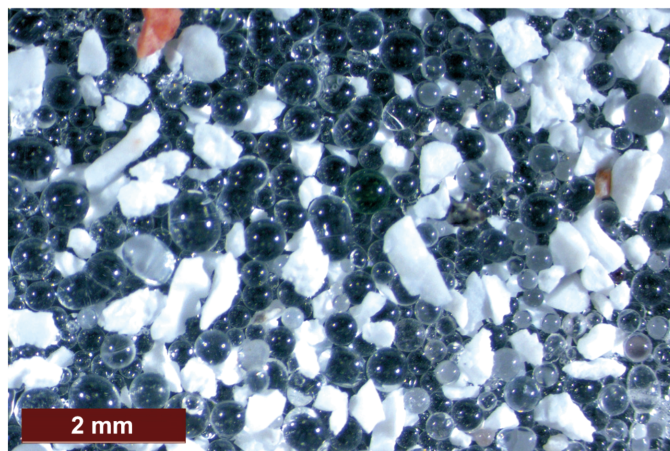


Fig. 1. Drop-on glass beads, fraction 212-850  $\mu\text{m}$ , mixed with 20% of opaque ASP (commercial grade product)  
Rys. 1. Mikrokulki szklane do nakładania przez posypywanie, frakcja o granulacji 212-850  $\mu\text{m}$  zmieszana z 20% nieprzezroczystych cząsteczek uszorstniających (produkt dostępny komercyjnie)

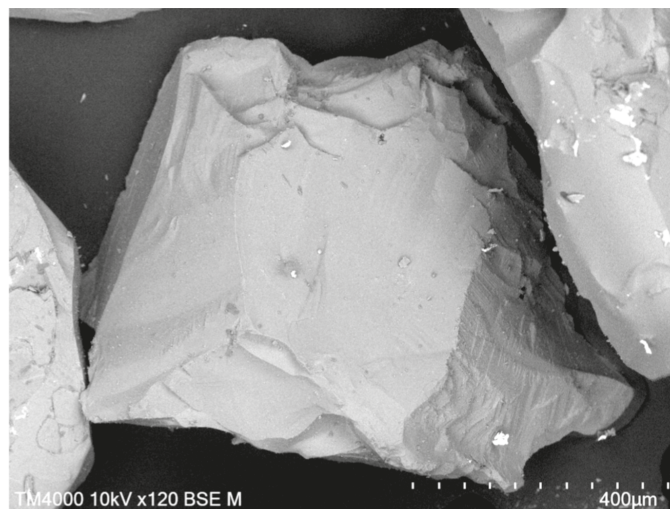


Fig. 2. Corundum particles under Scanning Electron Microscope (magnification 120 $\times$ )  
Rys. 2. Cząsteczki korundu, obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego (powiększenie 120 $\times$ )

Table 2. Evaluated drop-on materials

Tablica 2. Poddane ocenie materiały nakładane przez posypywanie

Material Materiał	Glass beads Mikrokulki szklane	Glass granulate Granulat szklany	Corundum Korund	Cristobalite sand Piasek	Bauxite Boksyt
Sample code Oznaczenie próbki	<i>GB</i>	<i>GG</i>	<i>EK</i>	<i>MG</i>	<i>BX</i>
Description Opis	Most typical GB for RM, prepared from recycled float glass. Najbardziej typowe mikrokulki szklane do oznakowań poziomych, produkowane z recyklowanego szkła typu „float”.	Ground float glass. Granulowane szkło typu „float”.	Very hard anti-skid material, relatively expensive. Materiał uszorstniający o bardzo wysokiej twardości, stosunkowo drogi.	Readily available, inexpensive material. Materiał łatwo dostępny, niedrogi.	Hard material, excessive processing required. Twardy materiał, wymaga nadmiernego przetwarzania.
Refractive index Współczynnik załamania światła	1.5	1.5	1.75	1.45-1.50	1.60-1.65
Hardness (Mohs scale) / Twardość (skala Mohsa)	5-6	5-6	9	6-7	8-9
Composition (main ingredients) Skład (główne składniki)	70-75% SiO <sub>2</sub> , 10-15% Na <sub>2</sub> O, 5-10% CaO, 2-5% MgO	70-75% SiO <sub>2</sub> , 10-15% Na <sub>2</sub> O, 5-10% CaO, 2-5% MgO	>95% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	>95% SiO <sub>2</sub>	75-80% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 10-15% SiO <sub>2</sub> , 1-5% TiO <sub>2</sub> , 1-5% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Density Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	2.5	2.5	4.0	2.3	3.8
Comments Uwagi	Transparent, round (>80% roundness). Do not contain crystalline silica. Przezroczyste, kuliste (krągłość >80%). Nie zawierają krystalicznej krzemionki.	Transparent, not round. Does not contain crystalline silica. Przezroczyste, niekuliste. Nie zawiera krystalicznej krzemionki.	Transparent. Contains no crystalline silica. Przezroczysty. Nie zawiera krystalicznej krzemionki.	Opaque. Contains crystalline silica. Nieprzezroczysty. Zawiera krystaliczną krzemionkę.	Opaque. Dark colour from Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; not suitable for white or yellow RM. Nieprzezroczysty. Ciemna barwa od Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Nieodpowiedni do oznakowań białych lub żółtych.

przyspieszyć zużycie oznakowania, nałożono je w postaci poprzecznych pasów, po których musiały przejechać wszystkie pojazdy przemieszczające się danym odcinkiem drogi – jest to uznana procedura oceny oznakowania poziomego [31, 67]. Odcinek testowy zlokalizowano

A typical commercially available quick-set white waterborne material was selected for the paint layer. It was applied at the target spreading rate  $0.6 \pm 0.05$  kg/m<sup>2</sup> with a portable application machine that is usually used for this type of small jobs. The waterborne paint was selected for

Table 3. Contents of toxic metals and metalloids<sup>a)</sup>Tablica 3. Zawartość toksycznych metali i półmetali<sup>a)</sup>

	Sample code Oznaczenie próbki	Pb (Lead / Ołów) [mg/kg]	As (Arsenic / Arsen) [mg/kg]	Sb (Antimony / Antymon) [mg/kg]
Glass beads <sup>b)</sup> / Mikrokulki szklane <sup>b)</sup>	GB	3.5 (0.1)	1.0 (0.0)	3.1 (0.2)
Glass granulate / Granulat szklany	GG	3.0 (0.2)	0.34 (0.01)	0.59 (0.42)
Cristobalite sand / Piasek	MG	0.43 (0.01)	0.20 (0.02)	0.049 (0.002)
Corundum / Korund	EK	<0.1	<0.1	<0.1

<sup>a)</sup> Maximum permitted contents: 200 mg/kg (standard EN 1436, Class A) or 50 mg/kg (Australian specification AP-S0042). Averages from three measurements are provided, standard deviations given in parentheses. <sup>b)</sup> Prepared from different batch of glass granulate than was used for the sample GG.

<sup>a)</sup> Maksymalne dopuszczalne zawartości: 200 mg/kg (norma EN 1436, klasa A) lub 50 mg/kg (specyfikacja australijska AP-S0042). Przedstawiono wartości średnie z trzech oznaczeń, odchylenia standardowe podano w nawiasach. <sup>b)</sup> Przygotowane z innej partii szkła niż próbka GG.

na dwukierunkowej, dwupasowej drodze w obszarze przemysłowym, o nawierzchni asfaltowej w dobrym stanie (subiektywna ocena wizualna, nie zmierzono równości). Natężenie ruchu drogowego każdego dnia roboczego wynosiło ok. 400 pojazdów ciężarowych (w większości członowych) oraz ok. 200 samochodów osobowych. Wszystkie pojazdy poruszały się z małą prędkością. Ponieważ pojazdy ciężarowe powodują dużo szybszy przyrost uszkodzeń na powierzchni drogi niż pojazdy lekkie [68], pomimo dość niskiego natężenia ruchu uzyskane oddziaływanie pojazdów było wystarczające do względnie szybkiego odwzorowania warunków, którym poddane są najintensywniej używane obszary typowych oznaczeń podłużnych. Chociaż dane zaprezentowano na skali czasu, możliwe jest łatwe wyliczenie liczby przejazdów celem dokonania porównań z innymi odcinkami doświadczalnymi; w niniejszym przypadku można oszacować, że liczba pojazdów, które przejechały przez każdą z linii poprzecznych podczas 10 miesięcy eksploatacji wyniosła 0,12 miliona (co odpowiada 0,68 miliona przejazdów, jeśli uwzględnić korektę ze względu na ciężar pojazdów).

Na warstwę farby wybrano typową, dostępną w obrocie komercyjnym, szybko schnącą białą farbę wodorozcieńczalną. Nałożono ją za pomocą niewielkiej malowarki zwykle stosowanej przy tego rodzaju małych pracach, przy zadanym wydatku materiału  $0,6 \pm 0,05 \text{ kg/m}^2$ . Farbę wodorozcieńczalną wybrano z dwóch powodów: po pierwsze,

two reasons: firstly, it was observed by the authors that in field tests it provided lower *PTV* than other types of paints (results not published so far); secondly, waterborne paints are an environmentally-friendly solution with minimised emissions of volatile organic compounds and marginal ozone formation potential [69].

Before testing, the drop-on materials (both the GB and the ASP) were first sieved to the fraction of 212-850  $\mu\text{m}$  and then coated in laboratory with appropriate organosilane to achieve good adhesion to the utilised paint. Despite its practical importance, the issue of adhesion between RM and drop-on materials has not been addressed in the literature so far; it is beyond the scope of this report and it is assumed that the optimum adhesion was achieved. Inter-mixing of the ASP with the GB was done by weight after they were coated, as is usually practiced during manufacturing; this way, the possibility of scratching the surface of GB is minimised. These materials were dropped-on using an in-house manual spreading device at the target spreading rate of  $0.4 \pm 0.05 \text{ kg/m}^2$ , immediately (i.e. within <2 s) after the paint had been applied; their proper embedment and loading were visually verified by the authors (observation through a 3 $\times$  loupe). The spreading rates of these materials, their dimensions, and granulation were matching those typically used for thin-layer RM in Europe. The apparently high measured variability is typical for field work with these types of materials and, based on professional

autorzy zaobserwowali w terenie, że osiąga ona niższe *PTV* niż inne farby (wyniki jeszcze nieopublikowane); po drugie jest to produkt przyjazny dla środowiska, pozwalający na minimalizację emisji lotnych związków organicznych oraz charakteryzujący się marginalnym potencjałem tworzenia ozonu [69].

Przed badaniem przesiano materiały (zarówno mikrokulki szklane jak i cząsteczki uszorstniające), uzyskując frakcję 212-850  $\mu\text{m}$ . Następnie pokryto je w laboratorium odpowiednim organosilanem, aby osiągnąć dobrą adhezję do zastosowanej farby. Pomimo dużego znaczenia praktycznego, kwestia adhezji między oznakowaniem poziomym a materiałami nakładanymi przez posypywanie nie została dotąd opisana w literaturze. Nie należy ona do zakresu niniejszej pracy; założono więc, że osiągnięta została optymalna adhezja. Mikrokulki szklane oraz ASP zmieszano w wybranym stosunku masowym po pokryciu ich organosilanem – zgodnie z typową praktyką produkcji. W ten sposób zminimalizowano prawdopodobieństwo wystąpienia zadrapań na powierzchni mikrokulek szklanych. Materiały były nakładane przez posypywanie z zastosowaniem urządzenia ręcznego własnej konstrukcji z zadaniem wydatkiem materiału  $0,4 \pm 0,05 \text{ kg/m}^2$  natychmiast po nałożeniu farby (to jest w ciągu  $<2 \text{ s}$ ); poprawne osadzenie materiału zostało zweryfikowane wizualnie przez autorów (dokonano obserwacji przez lupę o powiększeniu  $3\times$ ).

Wydatek, rozmiary oraz granulacja badanych materiałów zostały dobrane tak, aby odzwierciedlały typowe parametry oznakowań cienkowarstwowych w Europie. Dość wysoka zmienność jest typowa dla prac wykonywanych w terenie z użyciem materiałów tego typu. Na podstawie doświadczenia inżynierskiego nie wpływa ona istotnie na właściwości oznakowań; niemniej jednak należy w tym miejscu uznać, że może być ona potencjalnym źródłem nieścisłości.

Nałożone linie poprzeczne o długości  $2,90 \pm 0,05 \text{ m}$  oraz szerokości  $0,15 \pm 0,02 \text{ m}$  były zlokalizowane tak, aby zachodziły na oba pasy ruchu – jak pokazano na Rys. 3. Nie stosowano powtórzeń; widoczne na zdjęciu dodatkowe linie poprzeczne zostały nałożone w ramach innego, niepowiązanego doświadczenia. Oznakowanie zostało nałożone przy temperaturze powietrza  $27 \pm 2^\circ\text{C}$ , wilgotności względnej  $50 \pm 5\%$ , temperaturze nawierzchni  $33 \pm 1^\circ\text{C}$ , prędkości wiatru  $0,3 \pm 0,1 \text{ m/s}$  i bezchmurnym niebie. Każdy z 9 pasów testowych (oraz niepokryty farbą fragment nawierzchni traktowany jako próbka kontrolna) podlegał

experience, does not significantly affect the properties; nonetheless, this is a possible source of error that is hereby acknowledged.

The applied transverse lines,  $2.90 \pm 0.05 \text{ m}$  long and  $0.15 \pm 0.02 \text{ m}$  wide, were located as shown in Fig. 3 – encroaching on both traffic lanes. There were no repeats; the visible additional stripes were used for unrelated research. Conditions during the application: air temperature  $27 \pm 2^\circ\text{C}$ , relative humidity  $50 \pm 5\%$ , roadway temperature  $33 \pm 1^\circ\text{C}$ , wind speed  $0.3 \pm 0.1 \text{ m/s}$  and sunny skies. Each of the 9 test stripes (along with the asphalt surface as control) was evaluated periodically with procedures and equipment described in the standard EN 13036-4. The measurements were taken at the same location that was exposed to the full load of the traffic (at the wheel track, i.e. the most used area of each transverse line); the test locations were marked with white dots, visible in Fig. 3 on the left.

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

The collected *PTV* from periodic evaluations are given in Table 4. Even though *PTV* at less used areas (between wheel tracks) was not measured, one should observe that they would be undergoing the same process as the most used areas, albeit at a lower rate. The dissimilarities in the effectiveness of different materials in long-term perspective are graphically shown in Fig. 4; the limit for class *S1*,  $PTV \geq 45$ , is marked to emphasise that in most cases the *PTV* decreased below this limit within the exposure period.

Amongst the results, one should foremost note that covering the road surface (sample *RD*) with the paint without any drop-on material (sample *WB*) caused a significant drop in *PTV*, by more than 10 units, to a dangerously slippery level; hence, such applications should not be permitted at any roads. As expected, considerable increase in *PTV* was measured upon incorporation of the drop-on GB (sample *GB*), but class *S2* was only barely reached. Various ASP provided higher initial *PTV* than was measured for the road surface, with initial values reaching even class *S4*; impressively high initial *PTV* were measured with glass granulate (sample *GG*) and with bauxite (sample *BX*).

Upon the usage of the RM, the decrease in *PTV* from the initial measurements (average 54, range 48-65) to final (average 44, range 40-49) was considerable (average relative *PTV* decrease by 17%, range 6-32%). Whereas

Table 4. Field measurements of *PTV* at transverse linesTablica 4. Pomiary terenowe *PTV* linii poprzecznych

Anti-skid particles (ASP) Cząsteczki uszorstniające (ASP)	Sample code Oznaczenie próbki	GB quantity Ilość mikrokulek szklanych	ASP quantity Ilość ASP	Skid resistance: Pendulum Test Value ( <i>PTV</i> ) <sup>a)</sup> Szorstkość: wartość <i>PTV</i> <sup>a)</sup>			
				Initial <sup>b)</sup> Początkowa <sup>b)</sup>	2 months 2 miesiące	3 months 3 miesiące	10 months 10 miesięcy
None, asphalt surface Brak, powierzchnia warstwy asfaltowej	<i>RD</i>	–	–	49 (0.4)	–	47 (0.5)	47 (0.6)
None, paint only Brak, tylko farba	<i>WB</i>	0%	0%	35 (0.6)	35 (0.0)	34 (0.5)	36 (0.0)
None, only paint and GB Brak, tylko farba i mikrokulki	<i>GB</i>	100%	0%	45 (0.5)	44 (0.6)	43 (1.1)	41 (0.6)
Corundum Korund	<i>EK-10</i>	90%	10%	50 (0.5)	50 (0.0)	49 (0.6)	42 (0.0)
Corundum Korund	<i>EK-30</i>	70%	30%	51 (0.4)	54 (0.6)	49 (0.6)	43 (0.0)
Corundum Korund	<i>EK-50</i>	50%	50%	55 (0.6)	55 (0.0)	46 (0.9)	47 (0.0)
Corundum Korund	<i>EK</i>	0%	100%	48 (1.0)	49 (0.0)	46 (1.2)	45 (0.0)
Glass granulate Granulat szklany	<i>GG</i>	0%	100%	65 (0.5)	57 (0.6)	56 (0.4)	44 (0.0)
Cristobalite sand Piasek	<i>MG</i>	0%	100%	53 (1.7)	56 (0.0)	45 (0.0)	46 (0.6)
Bauxite Boksyt	<i>BX</i>	0%	100%	61 (0.5)	60 (0.0)	53 (1.0)	49 (0.0)

<sup>a)</sup> Unitless. Standard deviations provided in parentheses. <sup>b)</sup> Initial measurements were done 13 days after application, which is in agreement with the requirements of standard EN 1436 [40].

<sup>a)</sup> Wartość bezwymiarowa. Odchylenia standardowe podano w nawiasach. <sup>b)</sup> Pierwsze pomiary wykonano 13 dni po naniesieniu oznakowania, co jest zgodne z wymogami normy EN 1436 [40].

okresowej ocenie z zastosowaniem procedur i urządzeń opisanych w normie EN 13036-4. Pomiarów dokonywano w miejscach, które były najbardziej narażone na oddziaływanie ruchu (na najsilniej zużytych obszarach każdej linii poprzecznej); miejsca pomiarów zaznaczono białymi kropkami, widocznymi na Rys. 3 po lewej stronie.

the initial *PTV* of RM was larger than that of the neighbouring roadway surface in 6 out of 9 cases, after 10 months that remained true for one material only (sample *BX*). Investigation of the long-term performance changed the ranking of materials' effectiveness; particularly large *PTV* loss, from 65 to 44 (i.e. a relative decrease by 32%), was measured in the case of glass granulate (sample *GG*); at the end of the test period it provided *PTV* within only class *S0*.



#### 4. WYNIKI I DYSKUSJA

Wartości *PTV* zebrane podczas okresowych pomiarów na obszarach najsilniej zużytych (w śladzie koła) podano w Tabl. 4.

Wprawdzie nie mierzono *PTV* w miejscach mniej intensywnie używanych (między śladami kół), należy jednak mieć świadomość, że obszary te poddane są tym samym procesom co obszary intensywniej używane – jedynie zjawiska te postępują wolniej. Różnice między efektywnością różnych materiałów w perspektywie długoterminowej przedstawiono graficznie na Rys. 4; zaznaczono granicę klasy *S1*,  $PTV \geq 45$ , celem podkreślenia, że w większości przypadków wartość *PTV* spadła w badanym okresie poniżej tej granicy.

Przede wszystkim w wynikach zwraca uwagę fakt, że pokrycie powierzchni jezdni (próbka *RD*) farbą (próbka *WB*) spowodowało znaczny spadek *PTV* – o ponad 10 jednostek – do poziomu niebezpiecznej śliskości. W związku z tym takie rozwiązania nie powinny być dopuszczalne na żadnej drodze. Zgodnie z oczekiwaniami, zastosowanie posypki mikrokulek szklanych (próbka *GB*) spowodowało znaczny wzrost *PTV*, jednakże osiągnięto zaledwie klasę *S2*. Różne ASP zapewniły wyższe wartości początkowe *PTV* niż zmierzone dla samej powierzchni jezdni; początkowe wartości osiągnęły nawet klasę *S4*. Szczególnie wysokie początkowe wartości *PTV* stwierdzono dla granulatu szklanego (próbka *GG*) i boksytu (próbka *BX*).

Podczas eksploatacji oznaczeń poziomych spadek *PTV* od wartości początkowych (średnia 54, zakres 48-65) do końcowych (średnia 44, zakres 40-49) był znaczny (względny spadek *PTV* średnio o 17%, zakres 6-32%). O ile początkowa wartość *PTV* oznakowania była wyższa od *PTV* sąsiadującej powierzchni jezdni w 6 na 9 przypadków, po 10 miesiącach było tak już tylko w jednym przypadku (próbka *BX*). Ocena właściwości długoterminowych zmieniła ranking materiałów; najbardziej drastycznym przypadkiem był granulatu szklany (próbka *GG*), który wykazał największą stratę *PTV*, z 65 do 44 (tj. względny spadek o 32%), a na końcu badanego okresu kwalifikował się zaledwie do klasy *S0*. Miało to najprawdopodobniej związek ze stosunkowo niską twardością szkła, co przełożyło się na pewien stopień ścierania kanciastych powierzchni przez przejeżdżające pojazdy; nieregularna powierzchnia stała się gładzsza, jak w przypadku mikrokulek szklanych. Należy przyjąć, że zarówno kanciastość jak i twardość ASP miały



Fig. 3. Test field

Rys. 3. Poligon testowy

This was most likely due to the relatively low hardness of glass, which permitted for some surface polishing by tyres of the passing vehicles; hence, rough surface became smoother, like in *GB*. Definitely, both the angularity and the hardness of the ASP played the role in the outcome. The finding that initial *PTV* cannot be used to reliably predict the long-term performance could play a profound role in cases where the technical requirements are based only on the initial performance; fortuitously, in most European countries the minimum performance is demanded throughout the functional service life.

The exploratory study of the levels of corundum (samples *EK*, *EK-50*, *EK-30*, and *EK-10*) revealed that the mixtures of *GB* and corundum provided higher *PTV* than 100% corundum (sample *EK*). This may seem surprising until one realises that without *GB* many of the corundum particles would be embedded too deeply in paint; hence, with both the *GB* and the ASP there was effectively more material exposed above the paint surface to provide friction. In addition, due to the higher density of corundum and the application based on weight, the number of applied particles was lower.

Based on visual observation, the decrease in *PTV* appeared to have been partially caused by the removal

Table 5. The results of ANOVA<sup>a)b)</sup>Tablica 5. Wyniki analizy ANOVA<sup>a)b)</sup>

Source (independent variables) <sup>a)</sup> / Źródło (zmiennie niezależne) <sup>a)</sup>	<i>df</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	$\eta_p^2$	$\epsilon$
<i>RD, WB, GB, EK-10, EK-30, EK-50, EK, GG, MG, BX</i>	9	15.207	<0.001	0.835	0.198
<i>GB, EK-10, EK-30, EK-50, EK, GG, MG, BX</i>	7	8.258	<0.001	0.734	0.269
<i>EK, GG, MG, BX</i>	3	5.504	0.020	0.647	0.475
<i>EK-10, EK-30, EK-50, EK</i>	3	3.884	0.049	0.564	0.610

<sup>a)</sup> In all of the cases, *PTV* was the dependent variable. <sup>b)</sup> *df* – degrees of freedom; *F* – *F*-value; *p* – *p*-value;  $\eta_p^2$  – partial eta-square effect size;  $\epsilon$  – Greenhouse-Geisser epsilon factor (index of sphericity).

<sup>a)</sup> We wszystkich przypadkach zmienną zależną była wartość *PTV*. <sup>b)</sup> *df* – stopnie swobody; *F* – wartość *F*; *p* – wartość *p*;  $\eta_p^2$  – cząstkowa eta kwadrat (siła efektu);  $\epsilon$  – współczynnik epsilon Greenhouse'a-Geissera (wskaźnik sferyczności).

znaczący wpływ na uzyskany wynik. Wniosek, że początkowa wartość *PTV* nie może być wykorzystana do wiarygodnego prognozowania skuteczności długoterminowej, może odegrać znaczącą rolę w weryfikacji wymagań technicznych opartych wyłącznie na początkowych właściwościach; na szczęście w większości krajów europejskich oczekuje się, że minimalne parametry będą zachowane przez cały okres eksploatacji.

Wstępne badanie wpływu poziomu zawartości korundu w posypce (próbki *EK, EK-50, EK-30* oraz *EK-10*) wykazało, że mieszanki mikrokulek szklanych i korundu zapewniały wyższe wartości *PTV* niż 100% korundu (próbka *EK*). Może to wydawać się zaskakujące; należy sobie jednak uświadomić, że bez mikrokulek szklanych pewna część zastosowanego korundu będzie osadzona zbyt głęboko w farbie – w związku z tym dzięki obecności mikrokulek szklanych wzrosła efektywna ilość zapewniającego szorstkość materiału wystającego ponad farbę. Ponadto, ze względu na wyższą gęstość korundu oraz fakt, że był dodawany i mieszany w stosunku masowym, liczba użytych cząsteczek była niższa.

Na podstawie obserwacji wizualnej wydaje się, że spadek *PTV* był częściowo wywołany usunięciem całego oznakowania na pewnych obszarach jezdni – jak na przykładzie pokazanym na Rys. 5. Odślonięciu uległy wyszlifowane wcześniej ziarna w mieszance mineralno-asfaltowej, zaś rola ASP w zapewnieniu szorstkości została ograniczona. Niemniej jednak, jak pokazuje różnica między niepokrytym obszarem jezdni (próbka *RD*) a obszarami znaczonymi, zachowany został duży wpływ zastosowania farby i ASP.

Istotność statystyczną różnic między zmierzonymi wartościami *PTV* przeanalizowano wykonując cztery odrębne jed-

of the entire RM from parts of the road surface, as in the example shown in Fig. 5. The coarse fillers in asphalt that had been already polished by passing vehicles became exposed and the role of ASP in providing skid resistance became somewhat limited. Nonetheless, as evidenced by the differences in *PTV* between the road surface (sample *RD*) and the marked areas, considerable effects of the use of paint and ASP were retained.

Statistical significance of the differences between the measured *PTV* was analysed with four separate one-way analyses of variance (ANOVA); the variables and the outcome are given in Table 5. All of the ANOVA models showed that the measured effects were statistically significant at >95% confidence level (all *p*-values were lower than 0.05). In the case of the investigation focused on the levels of corundum, the *p*-value was approaching the statistical significance level.

This presented first systematic research on the topic is associated with numerous uncertainties and occasional deficiencies that must be noted and addressed. One could observe some inconsistencies and the absence of linear or logarithmic decay of *PTV* – these could have been caused by weather or by natural behaviour of RM similar to that reported in the case of retroreflectivity, which initially displays an increase, even for relative ly long period, before reaching the maximum value [70, 71]; additional extensive work, preferably done under laboratory conditions (and, as such, beyond the scope of this research), would be required to identify the exact reasons. Even though the exemplary study of ASP levels was done only on corundum, the authors expect, based on professional experience, that similar patterns

noczynnikowe analizy wariancji (ANOVA, ang. *analysis of variance*); zmienne oraz wyniki przedstawiono w Tabl. 5. Wszystkie modele ANOVA wykazały, że zmierzone efekty były istotne statystycznie na poziomie ufności >95% (wszystkie wartości  $p$  poniżej 0,05). W przypadku badania poświęconego poziomom zawartości korundu wartość  $p$  zbliżyła się do progu istotności statystycznej.

Zaprezentowane tutaj pierwsze systematyczne badanie poświęcone tematowi szorstkości oznakowania poziomego dróg obarczone jest licznymi źródłami niepewności oraz pewnymi potencjalnymi wadami, które należy odnotować i omówić. W wynikach zauważyć można pewne niespójności oraz brak liniowego bądź logarytmicznego spadku wartości  $PTV$  – mogło to być spowodowane czynnikami pogodowymi lub naturalnym zachowaniem oznakowania poziomego, podobnym do zachowania stwierdzonego w przypadku odbłaskowości, która może początkowo (nawet przez stosunkowo długi czas) wykazywać wzrost, nim osiągnie wartość maksymalną [70, 71]. Precyzyjne określenie przyczyn wymagać będzie obszernych dodatkowych prac badawczych, najlepiej przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych (a zatem nie wchodzących w zakres niniejszego opracowania). Wprawdzie przykładowe badania wpływu ilości ASP przeprowadzono tylko na korundzie, ale opierając się na doświadczeniu inżynierskim autorzy są przekonani, że podobnych schematów należy spodziewać się również w wypadku zastosowania innych cząsteczek uszorstniających. Odkrywanie powierzchni jezdni w miarę ścierania farby z pewnością miało wpływ na wyniki, ale zakres tego wpływu jest trudny do określenia bez dalszych obszernych badań. Kwestie związane z ASP zawartymi w warstwie farby stanowią odrębny temat badawczy, ale należy się spodziewać, że pojawią się w nim schematy zbliżone do tych stwierdzonych tutaj, z dodatkowym różnicowaniem wynikającym z twardości samej farby. Przedstawione badanie zostało zakończone po okresie zimowym, ponieważ typowy okres eksploatacji zastosowanej farby wodorozcieńczalnej został wyczerpany; nie zaplanowano w tym badaniu oceny innych materiałów cienkowarstwowych, chociaż według wcześniejszych doniesień autorów mogłyby one zapewnić dłuższy okres eksploatacji [12, 72]. Co oczywiste, wyniki uzyskane na jednym odcinku testowym nie mogą być reprezentatywne dla wszystkich innych odcinków testowych, zwłaszcza dla lokalizacji o odmiennych warunkach klimatycznych i ruchowych, co stanowi dodatkowe źródła niepewności.

would be emerging with other ASP. The issue of ASP premixed with the paint layer materials remains a separate research topic, but patterns similar to those reported herein could be anticipated, with the added variation related to the hardness of the paint itself. The exposure of the

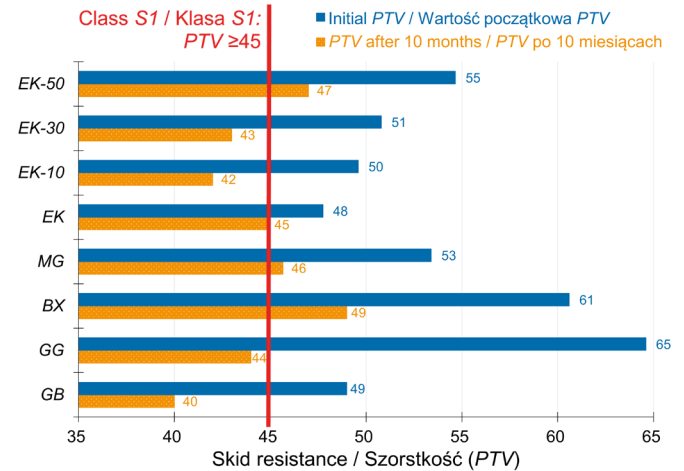


Fig. 4. Initial and final  $PTV$  achieved with the tested materials  
Rys. 4. Początkowe i końcowe wartości  $PTV$  badanych materiałów

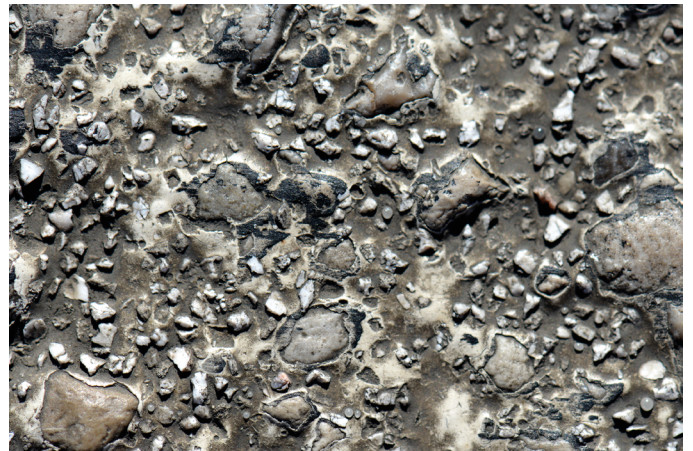


Fig. 5. Close-up image (magnification 3 $\times$ ) of the most used area of sample MG after 10 months  
Rys. 5. Powiększenie (3 $\times$ ) najbardziej zużytego obszaru oznakowania w obrębie próbki MG po 10 miesiącach

Dalsze proponowane prace poświęcone tej tematyce powinny obejmować badanie alternatywnych ASP stosowanych w różnych ilościach oraz charakteryzujących się różnymi rozmiarami, co pozwoliłoby na określenie ich wpływu na *PTV*. Jak dotąd w literaturze nie odniesiono się w sposób systematyczny do korelacji między rodzajami i ilościami ASP nakładanych przez posypywanie a widzialnością oznakowania w dzień oraz odblaskowością. Jest to niezwykle istotne – o ile wszystkim rodzajom oznakowania poziomego nadaje się odblaskowość poprzez posypanie mikrokulkami szklanymi, dodatki uszorstniające stosowane są tylko w niektórych przypadkach. Warty zbadania jest również wpływ na środowisko naturalne różnych rodzajów oznakowania dróg z różnymi ASP – zarówno mieszanymi z warstwą farby jak i nakładanymi przez posypywanie. Analizy cyklu życia wykazały, że kluczowym parametrem z punktu widzenia oceny środowiskowej oznakowań poziomych nie był ich skład, lecz faktyczny okres eksploatacji [71, 73]; niemniej jednak, nie uwzględniono w analizach wpływu zastosowania ASP. W ramach podjętych przez autorów prób oszacowania śladu węglowego oznakowań poziomych uwzględniono ASP, lecz bez różniczenia ze względu na ich typ [74]. Ponieważ cząsteczki uszorstniające, podobnie jak mikrokulki szklane, przyczyniają się do ochrony farby przed ścieraniem [6], powinien zostać zbadany wpływ doboru ASP na potencjalną emisję mikroplastików.

## 5. WNIOSKI

Z niniejszego krótkiego systematycznego badania wyciągnąć można następujące wnioski:

- Szorstkość oznakowania poziomego to temat rzadko podejmowany w badaniach, chociaż może ona mieć bardzo duży wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego, zwłaszcza dla pieszych i dla użytkowników jednośladów, a przede wszystkim, gdy powierzchnia jezdni jest mokra.
- Na cienkowarstwowym oznakowaniu poziomym zastosowanie cząsteczek uszorstniających nakładanych przez posypywanie jest konieczne, aby zapobiec śliskości.
- Dostępne ASP różnią się między sobą pod względem skuteczności, zarówno początkowej jak i długotrwałej.
- Początkowa wartość *PTV* nie może być stosowana do przewidywania właściwości oznakowania w całym okresie eksploatacji.

roadway surface as the paint was undergoing abrasion definitely played a role in the outcome, but its extent is difficult to assess without further excessive exploration. This research effort was terminated after winter exposure, because the typical functional service life of the utilised waterborne paint was reached; evaluation of other thin-layer materials was not intended, even though they were reported by the authors as capable of providing prolonged service life [12, 72]. Of course, results at one test site cannot be representative for all other test sites, particularly those with dissimilar climatic and road traffic conditions, which is an added uncertainty.

Further proposed work on this topic includes testing of alternative ASP along with evaluation of their various quantities and dimensions. Issue that has not been systematically addressed in the literature so far is the correlation between the types and quantities of the used drop-on ASP and daytime visibility and retroreflectivity of RM. This is critical – while all RM are reflectorized with drop-on GB, the ASP are utilised only sometimes. The sustainability of RM with various ASP, either premixed with the paint or applied as drop-on materials, is worth investigating as well. Life-cycle assessments revealed that the key parameter in environmental evaluation of RM was not their composition but the functional service life [71, 73]; however, the effects of ASP were not included. In the authors' efforts to estimate the carbon footprint of RM, the consumption of ASP was included, but their types were disregarded [74]. Because both the ASP and GB contribute to protecting the paint surface from abrasion [6], the impact of ASP selection on potential microplastics emission should also be tested.

## 5. CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn from this short systematic study:

- Skid resistance of RM is a seldom studied subject, even though it may be very important for road safety, particularly for pedestrians and for two-wheel vehicle users, especially when the roadway surface is wet.
- The use of drop-on ASP on thin layer RM is necessary to prevent slipperiness.
- Not all ASP are equal in terms of initial and long-term effectiveness.
- Initial *PTV* cannot be used to predict the performance throughout the functional service life.

- Stwierdzony znaczny spadek *PTV* oznakowania poziomego podczas eksploatacji może być niepokojący, zwłaszcza jeśli okres eksploatacji oznakowania będzie dłuższy niż pierwotnie zakładany.

Administratorzy dróg powinni żądać wysokich, lecz realistycznych wartości *PTV*; oczekiwane wartości powinny być dostosowane do obszaru, na którym nałożone jest oznakowanie – należy unikać zawyżania wymagań szorstkości, mogłoby to bowiem przełożyć się na utratę innych pożądaných właściwości, nieuzasadniony wzrost kosztów oraz ogólny spadek jakości. Zrozumienie potencjału i ograniczeń różnych materiałów i technologii ma kluczowe znaczenie; osiągnąć je można jedynie dzięki współpracy wszystkich stron zaangażowanych w proces znakowania dróg.

## OŚWIADCZENIE O KONFLIKCIE INTERESÓW

Tomasz E. Burghardt, Birgit Köck i Alexander Fasching są pracownikami firmy zajmującej się produkcją i nanoszeniem oznakowań drogowych. Wsparcie ich pracodawcy dla niniejszego badania było ograniczone do dostarczenia ocenianych materiałów oraz sprzętu do ich nanoszenia. Przedstawione tu wnioski są własnymi wnioskami autorów i nie muszą pokrywać się ze stanowiskiem ich pracodawcy. Zaprezentowane wyniki nie mają stanowić rekomendacji jakiegokolwiek systemu oznakowań drogowych jakiegokolwiek producenta, lecz demonstrację obecnych możliwości technologicznych. Anton Pashkevich deklaruje brak osobistych lub zawodowych konfliktów interesów.

- The measured large decrease in *PTV* upon usage of RM may be a reason for concern, particularly if RM are utilised beyond their intended functional service life.

Reasonably high *PTV* should be requested by the road administrators, but the demanded values should be matched with the desired application area – overengineering should be avoided, as it could ultimately cause the loss of other properties, unjustified increase in price, and overall decline in quality. Understanding of the capabilities and limitations of various materials and technologies is critical; it can be achieved only through cooperation of all the parties involved in road marking.

## CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

Tomasz E. Burghardt, Birgit Köck, and Alexander Fasching are employees of a company involved in road marking materials manufacture and application. Their employer supported the work presented herein through supplying the evaluated materials and application equipment. The statements given in this article are their own and do not necessarily represent the position of their employer. The results are not to serve as recommendation of any road marking system from any manufacturer, but are a demonstration of the available technologies. Anton Pashkevich declares no personal or business conflicts of interest.

## REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *Steyvers F.J., De Waard D.*: Road-edge delineation in rural areas: effects on driving behaviour. *Ergonomics*, **43**, 2, 2000, 223-238, DOI: 10.1080/001401300184576
- [2] *Burghardt T.E., Mosböck H., Pashkevich A., Fiolic M.*: Horizontal road markings for human and machine vision. *Transportation Research Procedia*, **48**, 2000, 3622-3633, DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.089
- [3] *Pocock B.W., Rhodes C.C.*: Principles of glass-bead reflectorization. *Highway Research Board Bulletin*, **57**, 1952, 32-48
- [4] *Babić D., Burghardt T.E., Babić D.*: Application and characteristics of waterborne road marking paint. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, **5**, 2, 2015, 150-169, DOI: 10.7708/ijtte.2015.5(2).06

- [5] *Schnell T., Zwahlen H.*: Driver preview distances at night based on driver eye scanning recordings as a function of pavement marking retroreflectivities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1692**, 1, 1999, 129-141, DOI: 10.3141/1692-14
- [6] *Burghardt T.E., Pashkevich A., Babić D., Mosböck H., Babić D., Żakowska L.*: Microplastics and road markings: the role of glass beads and loss estimation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **102**, 2022, 103123, DOI: 10.1016/j.trd.2021.103123
- [7] *Eigenmann L.*: Aggregate elements for improving anti-skid and visibility properties of traffic regulating markings on roadway pavements, United States Patent 3,958,891, United States Patent and Trademark Office, Washington, 1976
- [8] *Harlow A.*: Skid resistance and pavement marking materials, International Surface Friction Conference: Roads and Runways: Improving Safety Through Assessment and Design, Christchurch, 2005
- [9] *Babić D., Fiolić M., Babić D., Gates T.*: Road markings and their impact on driver behaviour and road safety: a systematic review of current findings. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 7843743; DOI: 10.1155/2020/7843743
- [10] *Burghardt T.E., Babić D., Babić D.*: Application of waterborne road marking paint in Croatia: two years of road exposure. *Proceedings of International Conference on Traffic and Transport Engineering*, Belgrade, 2016, 1092-1096
- [11] *Burghardt T.E., Ščukanec A., Babić D., Babić D.*: Durability of waterborne road marking systems with various glass beads. *Proceedings of International Conference on Traffic Development, Logistics and Sustainable Transport*, Opatija, 2017, 51-58
- [12] *Burghardt T.E., Babić D., Pashkevich A.*: Sustainability of thin layer road markings based on their service life. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **109**, 2022, 103339, DOI:10.1016/j.trd.2022.103339
- [13] *Fwa T.F.*: Skid resistance determination for pavement management and wet-weather road safety. *International Journal of Transportation Science and Technology*, **6**, 3, 2017, 217-227, DOI: 10.1016/j.ijtst.2017.08.001
- [14] *Yu M., You Z., Wu G., Kong L., Liu C., Gao J.*: Measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavement: a review. *Construction and Building Materials*, **260**, 2020, 119878, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119878
- [15] *Fwa T.F.*: Determination and prediction of pavement skid resistance—connecting research and practice. *Journal of Road Engineering*, **1**, 2021, 43-62, DOI: 10.1016/j.jreng.2021.12.001
- [16] *Guo F., Pei J., Zhang J., Li R., Zhou B., Chen Z.*: Study on the skid resistance of asphalt pavement: a state-of-the-art review and future prospective. *Construction and Building Materials*, **303**, 2021, 124411, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124411
- [17] *Anderson D.A., Henry J.J., Hayhoe G.F.*: Prediction and significance of wet skid resistance of pavement marking materials. *Transportation Research Record*, **893**, 1982, 27-32
- [18] *Januszke R.M., Richards D.M.*: Non-skid road marking paint system. *Proceedings of 15th Australian Road Research Board Conference*, Darwin, 1990, 181-195
- [19] *de Witt A.J., Smith R.A.F., Visser A.T.*: Durability and cost effectiveness of road marking paint. *South African Transport Conference*, Pretoria, 2000
- [20] *Pasetto M., Manganaro A.*: Study on the effect of surface texture saturation of road pavements with drop on road markings. *Proceedings of 5th Pan-European Conference on Planning for Minerals and Transport Infrastructure*, Sarajevo, 2006, 275-284
- [21] *Rao G.V., Mouli S.C., Boddeti N.K.*: Anti skid methods and materials-skid effects and their remedial methods. *International Journal of Engineering and Technology*, **2**, 2010, 87-92
- [22] *Karim M., Chyc-Cies J., Hartman B., Schick D., Dechkoff C.*: Evaluation of a skid resistant material at high incident intersection locations. *Conference of the Transportation Association of Canada*, Fredericton, 2012

- [23] *Pasetto M., Barbati S.D.*: Experimental investigation on road marking distress evolution: beyond testing, quality assurance and maintenance improvement. *Advanced Materials Research*, **723**, 2013, 846-853, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.723.846
- [24] *Asdrubali F., Buratti C., Moretti E., D'Alessandro F., Schiavoni S.*: Assessment of the performance of road markings in urban areas: the outcomes of the CIVITAS Renaissance project. *Open Transportation Journal*, **7**, 2013, 7-19, DOI: 10.2174/1874447801307010007
- [25] *Kajánek P., Ondrejka R.*: Pedestrian safety at crossings. *Acta Technológica*, **1**, 2, 2015, 1-4
- [26] *Richard C., Doré G., Lemieux C., Bilodeau J. P., Haure-Touzé J.*: Albedo of pavement surfacing materials: in situ measurements. In: Guthrie W.S. (ed.): *Cold Regions Engineering 2015: Developing and Maintaining Resilient Infrastructure*, 181-192, DOI: 10.1061/9780784479315.017
- [27] *Siyahi A., Kavussi A., Boroujerdian B.M.*: Enhancing skid resistance of two-component road marking paint using mineral and recycled materials. *International Journal of Transportation Engineering*, **3**, 3, 2016, 195-205, DOI: 10.22119/IJTE.2016.14773
- [28] *Kozak P., Matuszkova R., Radimsky M.*: Measurement of acoustic properties of the safety anti-skid modification - ROCBINDA™. *Advanced Materials Research*, **1145**, 2018, 140-145, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1145.140
- [29] *Naidoo S., Steyn W.*: Performance of thermoplastic road marking material. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, **60**, 2, 2018, 9-22, DOI: 10.17159/2309-8775/2018/v60n2a2
- [30] *Nassiri S., Rodin III H., Yekkarlar M.*: Evaluation of motorcyclists' and bikers' safety on wet pavement markings. PackTrans and Washington State University, Seattle, 2018
- [31] *Coves-Campos A., Bañón L., Coves-García J., Ivorra S.*: In situ study of road marking durability using glass microbeads and antiskid aggregates as drop-on materials. *Coatings*, **8**, 10, 2018, 371, DOI: 10.3390/coatings8100371
- [32] *Hadizadeh E., Pazokifard S., Mirabedini S. M., Ashraffian H.*: Optimizing practical properties of MMA-based cold plastic road marking paints using mixture experimental design. *Progress in Organic Coatings*, **147**, 2020, 105784, DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105784
- [33] *Purohit K., Rahman M., Price A., Woodside A.*: Assessment of preformed 3D-thermoplastic road markings for long-term durability, skid resistance and texture functionality. In: Raab C. (ed.): *Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements - Mairepav9*, Springer, Cham, 2020, 965-974, DOI: 10.1007/978-3-030-48679-2\_90
- [34] *Pasetto M., Barbati S.D.*: Definition and validation of a new methodical approach for friction evaluations of dropped-on products for road markings. 3rd International Surface Friction Conference, Gold Coast, 2011
- [35] *Piyatrapoomi N., Weligamage J., Kumar A., Bunker J.*: Identifying relationship between skid resistance and road crashes using probability-based approach. 2nd International Safer Roads Conference, Cheltenham, 2008
- [36] *Ivan J.N., Ravishanker N., Jackson E., Aronov B., Guo S.*: A statistical analysis of the effect of wet-pavement friction on highway traffic safety. *Journal of Transportation Safety & Security*, **4**, 2, 2012, 116-136, DOI: 10.1080/19439962.2011.620218
- [37] *Pitaksringkarn J., Tanwanichkul L., Yamthale K.*: A correlation between pavement skid resistance and wet-pavement related accidents in Thailand. *MATEC Web of Conferences*, **192**, 2018, 02049, DOI: 10.1051/mateconf/201819202049
- [38] *Tournier I., Dommes A., Cavallo V.*: Review of safety and mobility issues among older pedestrians. *Accident Analysis & Prevention*, **91**, 2016, 24-35, DOI: 10.1016/j.aap.2016.02.031
- [39] *Cleland B.S., Walton D., Thomas J.A.*: The relative effects of road markings on cycle stability. *Safety Science*, **43**, 2, 2005, 75-89, DOI: 10.1016/j.ssci.2005.01.001

- [40] Standard EN 1436:2018 Road marking materials – Road marking performance for road users and test methods
- [41] Standard EN 13036-4:2011 Road and airfield surface characteristics – Test methods – Part 4: method for measurement of slip/skid resistance of a surface – The pendulum test
- [42] Standard ASTM E 303:1993 Standard test method for measuring surface frictional properties using the British pendulum tester
- [43] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 3 lipca 2003 r., załącznik nr 2: Szczegółowe warunki techniczne dla znaków drogowych poziomych i warunki ich umieszczania na drogach. Dz. U. nr 220, poz. 2181, 2019
- [44] Standard ONR 22441:2015 Richtlinien zur Spezifikation von Bodenmarkierungen und Bodenmarkierungsmaterial
- [45] Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways. United States Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, 2009
- [46] Giles C., Sabey B., Cardew K.H.: Development and performance of the portable skid-resistance tester. Symposium on Skid Resistance, New York, 1962, 50-74, DOI: 10.1520/STP44406S
- [47] Chu L., Guo W., Fwa T.F.: Theoretical and practical engineering significance of British pendulum test. International Journal of Pavement Engineering, **23**, 1, 2020, DOI: 10.1080/10298436.2020.1726351
- [48] Hiti M., Ducman V.: Analysis of the slider force calibration procedure for the British pendulum skid resistance tester. Measurement Science and Technology, **25**, 2, 2014, 025013, DOI: 10.1088/0957-0233/25/2/025013
- [49] Guo W., Chu L., Fwa T.F.: Evaluation of calibration procedures of British pendulum tester. Journal of Testing and Evaluation, **49**, 3, 2020, 1729-1746, DOI: 10.1520/JTE20200288
- [50] Guo W., Chu L., Fwa T.F.: Improved calibration procedure for British pendulum tester. In: Pasindu H.R., Bandara S., Mampearachchi W.K., Fwa T.F. (eds.): Road and Airfield Pavement Technology, Springer, Cham, 2022, 209-219, DOI: 10.1007/978-3-030-87379-0\_15
- [51] Guo W., Chu L., Fwa T.F.: Mechanistic harmonization of British pendulum test measurements. Measurement, **182**, 2021, 109618, DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109618
- [52] Primožič V., Hiti M.: Investigation of the British pendulum calibration uncertainty by Monte Carlo simulation. Measurement Science and Technology, **33**, 1, 2021, 015004, DOI: 10.1088/1361-6501/ac2c4b
- [53] Lundkvist S.O., Isacsson U.: Prediction of road marking performance. Journal of Transportation Engineering, **133**, 6, 2007, 341-346, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:6(341)
- [54] Wang D.W., Schacht A., Schmidt S., Oeser M., Steinauer B., Chen X.H.: Continuous evaluation of the road skid resistance with ViaFriction. Applied Mechanics and Materials, **405**, 2013, 1791-1794, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.405-408.1791
- [55] Steinauer B., Oeser M., Kemper D., Schacht A., Klein G.M.: Dynamische Messung der Griffigkeit von Fahrbahnmarkierungen. Verkehrstechnik Heft V 239, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2014
- [56] Schacht A., Oeser M.: Bewertung der Griffigkeit von Fahrbahnmarkierungen bei Naesse. Straße und Autobahn, **65**, 8, 2014, 583-590
- [57] Wälivaara, B.: Validering av VTI-PFT version 4: mätningar på plana och profilerade vägmarkeringar. Swedish National Road and Transport Research Institute VTI, Linköping, 2007, <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:670355/FULLTEXT01.pdf>, 20.12.2022
- [58] Andriejauskas T., Vorobjovas V., Mielonas V.: Evaluation of skid resistance characteristics and measurement methods. Proceedings of the 9th International Conference “Environmental Engineering”, Vilnius, 2014
- [59] Rasol M., Schmidt F., Ientile S., Adelaide L., Nedjar B., Kane M., Chevalier C.: Progress and monitoring opportunities of skid resistance in road transport: a critical review and road sensors. Remote Sensing, **13**, 18, 2021, 3729, DOI: 10.3390/rs13183729
- [60] Standard EN 1423:2012 Road marking materials. Drop on materials. Glass beads, antiskid aggregates and mixtures of the two



- [61] Sandhu N.K., Axe L., Ndiba P.K., Jahan K.: Metal and metalloids concentrations in domestic and imported glass beads used for highway marking. *Environmental Engineering Science*, **30**, 7, 2013, 387-392, DOI: 10.1089/ees.2013.0023
- [62] dos Santos É.J., Herrmann A.B., Prado S.K., Fantin E.B., dos Santos V.W., de Oliveira A.V.M., Curtius A.J.: Determination of toxic elements in glass beads used for pavement marking by ICP OES. *Microchemical Journal*, **108**, 2013, 233-238, DOI: 10.1016/j.microc.2012.11.003
- [63] Specification AP-S0042. Glass beads for use in pavement marking paints. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Materials Science and Engineering Division, Highett, 2013
- [64] Burghardt T.E., Pashkevich A.: Green Public Procurement criteria for road marking materials from insiders' perspective. *Journal of Cleaner Production*, **298**, 2021, 126521, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126521
- [65] Burghardt T.E., Ettinger K., Köck B., Hauzenberger C.: Glass beads for road markings and other industrial usage: crystallinity and hazardous elements. *Case Studies in Construction Materials*, **17**, 2022, e01213, DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01213
- [66] Migaszewski Z.M., Gahuszka A., Dołęgowska S., Michalik A.: Glass microspheres in road dust of the city of Kielce (south-central Poland) as markers of traffic-related pollution. *Journal of Hazardous Materials*, **431**, 2021, 125355, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125355
- [67] Pike A.M., Songchitruksa P.: Predicting pavement marking service life with transverse test deck data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2482**, 1, 2015, 16-22, DOI: 10.3141/2482-03
- [68] Rys D., Judycki J., Jaskula P.: Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data. *International Journal of Pavement Engineering*, **17**, 8, 2016, 716-726, DOI: 10.1080/10298436.2015.1019493
- [69] Burghardt T.E., Pashkevich A.: Emissions of volatile organic compounds from road marking paints. *Atmospheric Environment*, **193**, 2018, 153-157, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.08.065
- [70] Sarasua W., Clarke D., Davis W.: Evaluation of interstate pavement marking retroreflectivity. Report FHWA-SC-03-01. South Carolina Department of Transportation, Columbia, 2003
- [71] Burghardt T.E., Pashkevich A., Żakowska L.: Influence of volatile organic compounds emissions from road marking paints on ground-level ozone formation: case study of Kraków, Poland. *Transportation Research Procedia*, **14**, 2016, 714-723, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.338
- [72] Burghardt T.E., Pashkevich A., Bartusiak J.: Solution for a two-year renewal cycle of structured road markings. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **20**, 1, 2021, 5-18, DOI: 10.7409/rabdim.021.001
- [73] Cruz M., Klein A., Steiner V.: Sustainability assessment of road marking systems. *Transportation Research Procedia*, **14**, 2016, 869-875, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.035
- [74] Wenzel K.M., Burghardt T.E., Pashkevich A., Buckermann W.A.: Glass beads for road markings: surface damage and retroreflection decay study. *Applied Sciences*, **12**, 4, 2022, 2258, DOI: 10.3390/app12042258