



TOMASZ E. BURGHARDT¹⁾
 ANTON PASHKEVICH²⁾
 KEVIN M. WENZEL³⁾

A STUDY OF PREMIUM GLASS BEADS FOR ROAD MARKING MATERIALS

BADANIE WYSOKOGATUNKOWYCH SZKLANYCH MIKROKULEK ODBLASKOWYCH DO OZNAKOWANIA DROGOWEGO

STRESZCZENIE. Oznakowanie poziome stanowi niezbędny element bezpieczeństwa ruchu drogowego. Warunkiem jego skuteczności jest zapewnienie odblaskowości, co uzyskuje się przez powierzchniową warstwę mikrokulek szklanych. W celu wykazania różnic między oznakowaniem poziomym cienkowarstwowym wykonanym w technologii tradycyjnej a nowoczesnymi rozwiązaniami przeprowadzono porównawcze badania terenowe czterech systemów oznakowania. Na podstawie pomiarów odblaskowości stwierdzono, że zarówno rodzaj farby, jak i mikrokulek znacząco wpływają na trwałość użytkową oznakowania. Zastosowanie farby wodorozcieńczalnej z posypką mikrokulek szklanych najwyższej jakości pozwoliło na ponad sześciokrotne zwiększenie trwałości użytkowej w porównaniu do systemu tradycyjnego. Z przeprowadzonej analizy finansowej wynika, że znacząco wyższe nakłady początkowe związane z cenami nowoczesnych materiałów zwracają się całkowicie dzięki większej trwałości użytkowej; w dłuższym horyzoncie czasowym przynoszą oszczędności na poziomie nawet 65%. W przeprowadzonych następnie analizach powierzchni mikrokulek pod mikroskopem optycznym i elektronowym obserwowano zarówno mikrokulki w stanie nienaruszonym jak i uszkodzone. Zaskoczeniem był charakter uszkodzeń mikrokulek, na których zamiast oczekiwanych zarysowań zauważono ubytki w kształcie kraterów.

SŁOWA KLUCZOWE: farba wodorozcieńczalna, mikrokulki szklane, odblaskowość, poziome oznakowanie drogowe, trwałość użytkowa, uszkodzenia mikrokulek szklanych.

ABSTRACT. Road markings are a necessary safety feature on almost all roads. For appropriate performance they must be reflectorised with glass beads. To demonstrate the differences between traditional and modern thin-layer road marking solutions, four road marking systems were compared in the field. Based on measurements of retroreflectivity, influence of glass beads and paint on service life was estimated. The use of high-performance waterborne paint reflectorised with premium glass beads permitted for over sixfold extension of durability. Financial analysis demonstrated that the considerable additional expense associated with purchase of modern materials was fully offset through increased service life: even 65% savings could be realised in the long term. Subsequent analysis of the used glass beads under optical and scanning electron microscopes provided information about their surface; intact and damaged glass beads were observed. Surprisingly, damaged glass beads were found to have crater-like surface features instead of the expected scratches.

KEYWORDS: glass beads, glass beads damage, retroreflectivity, road markings, service life, waterborne paint.

DOI: 10.7409/rabdim.021.008

¹⁾ M. Swarovski GmbH, Industriestraße 10, 3300 Amstetten, Austria; tomasz.burghardt@swarco.com

²⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra Systemów Transportowych, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; apashkevich@pk.edu.pl (✉)

³⁾ Hochschule Esslingen, Kanalstraße 33, 73728 Esslingen am Neckar, Germany, and Swarco Limburger Lackfabrik GmbH, Robert-Bosch-Straße 17, 65582 Diez, Germany; kevin.wenzel@swarco.com

1. INFORMACJE OGÓLNE

Poziome oznakowanie drogowe, wszechobecny i niezastąpiony element bezpieczeństwa drogowego, wymaga częstego odnawiania w celu zachowania parametrów. Wyznacznikiem trwałości użytkowej tego elementu bezpieczeństwa ruchu jest jego odbłaskowość uzyskana przez zatopienie w farbie mikrokulek szklanych, które odbijając światło padające z reflektorów pojazdów zapewniają dobrą widoczność oznakowania w nocy na drogach nieoświetlonych. Zwiększenie widoczności nocą ma zasadnicze znaczenie dla bezpieczeństwa ruchu drogowego ze względu na odnotowaną relatywnie większą częstotliwość i groźniejsze skutki wypadków w porze nocnej [1, 2]. W tej sytuacji uzasadnione jest wykorzystanie powierzchniowego współczynnika odbłasku R_L jako miary trwałości użytkowej oznakowania poziomego. W ostatnim czasie Federacja Drogowa Unii Europejskiej (ERF) zaproponowała kryterium utrzymania minimalnej wartości R_L na poziomie $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ [3], która jest zbieżna z wynikami analiz potrzeb wizualnych kierowców [4, 5].

Oznakowanie poziome traktować należy jako system złożony z warstwy barwnej (farby) i warstwy odbłaskowej (mikrokulki szklane), który spełnia swoje zadanie wyłącznie w przypadku prawidłowej współpracy tych dwóch elementów składowych [6]. W niniejszej analizie skupiono się na porównaniu technologii tradycyjnej z technologią opartą na wykorzystaniu nowoczesnych materiałów przeznaczonych do wykonania cienkowarstwowego oznakowania poziomego [7]. Porównano typową rozpuszczalnikową farbę drogową (jako przykład technologii tradycyjnej) z wysokogatunkową farbą wodorocieńczalną (stanowiącą przykład nowoczesnego, zaawansowanego technologicznie rozwiązania materiałowego) z wykorzystaniem mikrokulek szklanych standardowych (jako przykład tradycyjnej, sprawdzonej technologii) oraz mikrokulek szklanych wysokogatunkowych (będących przykładem dopiero wchodzącego na rynek rozwiązania). Jako kryterium trwałości użytkowej analizowanych systemów wykorzystano wartości R_L uzyskane w pomiarach terenowych na liniach poprzecznych. Ze względu na wyższe koszty jednostkowe nowoczesnych materiałów przeprowadzono również analizę finansową. Ponadto, powierzchnie mikrokulek w stanie nie naruszonym i uszkodzonych poddano oględzinom pod mikroskopem optycznym oraz elektronowym. Przedstawione wstępne wyniki analizy obrazu powierzchni mikrokulek szklanych w dużym powiększeniu stanowią najprawdopodobniej pierwsze rozpoznanie tej kwestii o dużym znaczeniu z praktycznego punktu widzenia.

1. BACKGROUND

Horizontal road markings – a ubiquitous and currently irreplaceable safety feature present on majority of roads – demand frequent renewals. Their service life is measured through retroreflectivity, achieved due to embedded glass beads, which provide night time visibility of the markings in vehicle headlights on unlit roads. Visibility at night is critical, considering the reported increased frequency and severity of vehicular accidents occurring at night as compared to daytime [1, 2]. Consequently, service life of horizontal road markings is measured through coefficient of retroreflected luminance R_L . The European Union Road Federation (ERF) has recently proposed that a minimum R_L of $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ be maintained [3]; this value coincides with an assessment of the visual needs of the drivers [4, 5].

Road markings have to be considered as systems, consisting of a colour layer (paint) and a retroreflective layer (glass beads); only their cooperation ensures a functional product [6]. This analysis concentrates on a comparison between the old technology and advanced modern materials for thin-layer road markings [7]. Evaluation encompassed typical solventborne road marking paint (an example of old technology) against a high-performance waterborne paint (an example of an advanced modern material), both reflectorised with standard glass beads (old and proven technology) against premium glass beads (emerging modern advanced solution). In this article, R_L data obtained from a transverse lines field test was utilised to assess the different systems in terms of service life. Financial analysis was also performed because of the increased unit costs of the modern materials. In addition, the surface of intact and damaged glass beads was analysed under Scanning Electron Microscope (SEM). The presented preliminary results from large-magnification surface analysis of glass beads used for road markings appear to be the first report addressing this important practical issue.

2. METHODOLOGY

2.1. MATERIALS

Basic information about the evaluated road marking materials is given in Table 1. Material characteristics were mainly obtained through publicly available information such as Safety Data Sheets, Technical Data Sheets, and performance certificates. All of the materials used are commercially available and meet the specifications set in standards EN 1423 [8] and EN 1436 [9]. Ozone formation potential (OFP) was calculated based on previously established methodology utilising the emissions of total organic

2. METODYKA BADANIA

2.1. MATERIAŁY

Podstawowe informacje dotyczące analizowanych materiałów do oznakowania poziomego zawarto w Tabl. 1. Dane o materiałach uzyskano głównie z powszechnie dostępnych informacji, m.in. Kart Charakterystyki Substancji Niebezpiecznej, kart danych technicznych i deklaracji właściwości użytkowych. W badaniach wykorzystano wyłącznie materiały dostępne w handlu i spełniające wymagania norm PN-EN 1423 [8] i PN-EN 1436 [9]. Potencjał tworzenia ozonu (OFP) wyliczono na podstawie metody opartej na całkowitej emisji gazów organicznych (TOG) zamiast nominalnych emisji lotnych związków organicznych (VOC) [10, 11]. Ceny przyjęto na podstawie wcześniejszego rozeznania średnich cen rynkowych [12], korygując je w celu uwzględnienia obecności 20% standardowych mikrokulek szklanych zmieszanych z wysokogatunkowymi.

gases (TOG) instead of nominal contents of volatile organic compounds (VOC) [10, 11]. Prices were estimated based on a prior survey's averages [12]; appropriate adjustments were made to account for the presence of 20% standard glass beads amongst the premium material.

2.2. FIELD TESTING

Evaluation of road markings is difficult due to the abundance of factors affecting their performance. For the purpose of this analysis, the markings were applied in transverse direction, which permitted for accurate estimation of the number of vehicles crossing them. It is a known and efficient method of their quick evaluation because every passing vehicle encroaches on such marking [13, 14]. Even though traffic load at a motorway can be much higher, the reported number of lane changes is relatively low when one considers the marked area [15]; indeed, observation of a multi-lane road carrying annual average daily traffic of 226,848 vehicles, after recalculating for the marked surface, yielded only 2,202 crossings of the marked area corresponding to a transverse line area [16].

Table 1. Road marking materials
Tablica 1. Materiały na wykonanie oznakowania poziomego

Material Materiał	Description, selected physical properties, estimated price Opis, wybrane własności fizyczne, szacowana cena
Solventborne paint Farba rozpuszczalnikowa	High-solids solventborne paint, white, acrylic resin, toluene solvent Farba rozpuszczalnikowa o wysokiej zawartości substancji stałych, biała, na bazie żywic akrylowych, rozpuszczalnik: toluen. VOC = 24.5%, OFP = 975 g O ₃ /kg, density / gęstość = 1.60 g/cm ³ . Estimated price / szacowana cena = 1.72 EUR/kg.
High-performance waterborne paint Wysokogatunkowa farba wodorocieńczalna	Waterborne paint based on acrylic self-crosslinking resin, white Farba wodorocieńczalna na bazie samosieciującej żywicy akrylowej, biała. Water content / zawartość wody = 21.6%, VOC = 0.7%, OFP = 21 g O ₃ /kg, density / gęstość = 1.65 g/cm ³ . Estimated price / szacowana cena = 2.59 EUR/kg.
Standard glass beads Mikrokulki szklane standardowe	Glass beads made from recycled float glass. Refractive index of 1.5 (Class A per EN 1423), heavy metals and metalloids content below 200 mg/kg (Class 1 per EN 1423), roundness > 80%. Applied size 212-850 μm, coated for adhesion, contain 20% of non-transparent anti-skid particles. Mikrokulki wykonane z materiałów z recyklingu. Współczynnik załamania światła 1,5 (klasa A wg PN-EN 1423), zawartość metali ciężkich i półmetali poniżej 200 mg/kg (klasa 1 wg PN-EN 1423), kulistość > 80%. Do znakowania zastosowano granulację 212-850 μm, materiał z powłoką adhezyjną, z 20% dodatkiem nieprzezroczystych cząsteczek uszorstniających. Estimated price / szacowana cena = 0.58 EUR/kg.
Premium glass beads Mikrokulki szklane wysokogatunkowe	Glass beads made from virgin raw materials. Refractive index of 1.6-1.7 (Class A per EN 1423), heavy metals and metalloids content below 200 mg/kg (Class 1 per EN 1423), roundness > 90%. Applied size 212-850 μm, coated for adhesion, intermixed with 20% standard glass beads, contain 20% of non-transparent anti-skid particles. Mikrokulki wykonane z surowców pierwotnych. Współczynnik załamania światła 1,6-1,7 (klasa A wg PN-EN 1423), zawartość metali ciężkich i półmetali poniżej 200 mg/kg (klasa 1 wg PN-EN 1423), kulistość > 90%. Do znakowania zastosowano granulację 212-850 μm, materiał z powłoką adhezyjną, zmieszane z 20% mikrokulek standardowych, z 20% dodatkiem nieprzezroczystych cząsteczek uszorstniających. Estimated price / szacowana cena = 5.42 EUR/kg.

2.2. BADANIA TERENOWE

Ocena trwałości oznakowania poziomego jest często problematyczna ze względu na dużą ilość czynników, które należy wziąć pod uwagę. Do celów niniejszej analizy wykonano oznakowanie w poprzek jezdni, przez co możliwe było dokładne wyznaczenie liczby przejeżdżających przez nie pojazdów. Jest to znana i efektywna metoda szybkiej oceny trwałości oznakowania, gdyż każdy przejeżdżający pojazd na nie wjeżdża [13, 14]. Nawet na autostradzie, gdzie natężenie ruchu bywa znacznie większe, ilość zmian pasa ruchu jest stosunkowo niewielka jeśli się weźmie pod uwagę powierzchnię oznakowaną [15]: obserwacje terenowe wielopasmowej autostrady ze średniorocznym dziennym natężeniem ruchu 226 848 pojazdów, po przeliczeniu na powierzchnię oznakowania, wykazały tylko 2202 przejazdy przez oznakowany obszar pasa ruchu odpowiadający powierzchni oznakowania poprzecznego [16].

Badanie przeprowadzono w Chorwacji, w pobliżu Zagrzebia, na drodze jednojezdniowej dwukierunkowej o średnim dobowym ruchu rocznym składającym się z 6983 pojazdów lekkich i 653 ciężkich (tj. pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3500 kg oraz wszystkich autobusów). Opublikowane już poprzednio wstępne wyniki ww. badania terenowego [17] w niniejszej pracy uzupełniono o dodatkowe dane i przeprowadzoną analizę innego typu. Ważną kwestią, którą należy uwzględnić przy ocenie oznakowania poziomego jest intensywność zimowego utrzymania nawierzchni drogowej. Biorąc pod uwagę warunki klimatyczne Chorwacji uszkodzenia oznakowania przez pługi śnieżne uznano za zjawisko o marginalnym znaczeniu. Warto jednak zwrócić uwagę, że jedna operacja odśnieżania powoduje obniżenie odbłaskowości na poziomie $3,2 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ według [18] lub nawet $6,0\text{-}6,2 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ według [19]. Wyjątkowo duże obciążenia związane z odśnieżaniem mogą nawet spowodować zniszczenie oznakowania poziomego, jak to miało miejsce w przypadku analogicznego oznakowania wykonanego na jednej z górskich przełęczy w Polsce, które uległo zniszczeniu po 223 przejazdach pługu śnieżnego [20]. Jednakże, ten sam system oznakowania drogowego charakteryzował się dwuletnią trwałością w innym badaniu terenowym w Polsce, na drodze którą przejechały tylko 22 pługi śnieżne z opuszczonym lemieszem [21].

Oznakowanie poddane badaniu zostało wykonane, przy wykorzystaniu standardowego sprzętu i typowej technologii robót, przez miejscową firmę specjalistyczną, zwycięzcę przetargu na tego rodzaju prace. Założona grubość mokrej powłoki farby wynosiła $400 \mu\text{m}$ (co odpowiada $0,60\text{-}0,65 \text{ kg/m}^2$) a mikrokulki szklane posypywano na świeżo ułożoną farbę w ilości $0,40 \text{ kg/m}^2$. Rzeczywista intensywność posypki mogła nieznacznie odbiegać od założonej, choć wizualna

The testing was done near Zagreb, Croatia at a bidirectional single-carriageway road carrying annual average daily traffic comprising 6,983 light and 653 heavy vehicles (i.e. with gross vehicle weight rating over 3,500 kg and all buses). Limited preliminary results from this field test were previously reported [17]; additional data is given and another type of analysis is performed herein. An important consideration in evaluation of road markings is the extent of winter maintenance. Under climatic conditions of Croatia, damage to the markings caused by snow ploughs was deemed to be marginal. It is worth noting that such damage has been estimated in terms of retroreflectivity loss per snow ploughing at $3.2 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ [18] or $6.0\text{-}6.2 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ [19]. Extremely intense snow removal operations (223 snow plough passes) within one winter has been reported to cause a failure of equivalent road marking system applied at a mountain pass in Poland [20]. However, the same high-performance waterborne paint and premium glass beads furnished a two-year durability in a trial done also in Poland, but at a road where there were 22 snow ploughing operations [21].

Marking was done by a local company that won the road maintenance tender, with their standard equipment and technique. The paints were applied at a target wet film build of $400 \mu\text{m}$ (i.e. $0.60\text{-}0.65 \text{ kg/m}^2$) and glass beads were immediately dropped on at a target weight of 0.40 kg/m^2 . The actual application rates could differ slightly, but visual evaluation of glass beads load and embedment indicated that they were within 20% of the target. The arrangement of markings and application method are shown in Fig. 1. Periodic measurements of R_L with a handheld retroreflectometer (ZRM1013+; Zehntner Testing Instruments, Sissach, Switzerland), 13 data points per line, were taken until failure was recorded. Average values are provided, even though there were differences between the least- and most-used sections of the marking.



Fig. 1. Application of transverse lines
Rys. 1. Wykonywanie linii poprzecznych

ocena ilości mikrokulek i ich zatopienia w warstwie farby wskazują, że różnica ta nie przekraczała 20%. Rozmieszczenie wykonanego oznakowania i technologię robót przedstawiono na Rys. 1. Wartość R_L oznaczano okresowo przy użyciu reflektometru (ZRM1013+, Zehntner Testing Instruments, Sissach, Szwajcaria) w 13 punktach pomiarowych na linię do momentu całkowitej utraty właściwości. Pomimo różnic między najmniej i najbardziej obciążonymi fragmentami oznakowania w analizie uwzględniono wartości średnie.

2.3. ANALIZA FINANSOWA

Ocenę ekonomiczną przeprowadzono przy wykorzystaniu metodyki zastosowanej przez autorów w poprzednich pracach [12, 22, 23]. Trwałość użytkową wyraża się przez okres czasu lub liczbę przejazdów do momentu utraty przez oznakowanie właściwości użytkowych (najczęściej spadku R_L) i związanej z tym konieczności odnowy. Liczbę przejazdów skorygowano współczynnikiem uwzględniającym udział ruchu ciężkiego, zgodnie z normą austriacką ONR 22440-1 [24]. Podejście takie umożliwia porównanie wyników otrzymanych na drogach o różnym obciążeniu i strukturze ruchu. Oprócz uwzględnienia większej masy pojazdów, norma ONR 22440-1 podaje szereg innych czynników mających wpływ na intensywność uszkodzeń, takich jak np. szerokość pasa ruchu, których nie wzięto tutaj pod uwagę. W celu uzyskania wspólnych ram dla takich obliczeń przyjęto, że trwałość użytkowa jest wprost proporcjonalna do obciążenia ruchem.

Jako punkt graniczny trwałości użytkowej oznaczający konieczność odnowy zużytego oznakowania przyjęto, zgodnie z wytycznymi ERF [3], spadek R_L do poziomu $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. W każdym przypadku trwałość użytkową oszacowano dopasowując do zbioru danych R_L krzywą wykładniczą [25]. Dla celów analizy kosztów, nakłady obliczono zarówno osobno dla każdego przypadku odnowy oznakowania, jak i dla ich serii następujących w arbitralnie ustalonym okresie 20 mln przejazdów pojazdów (po korekcie uwzględniającej udział ruchu ciężkiego), co odpowiada okresowi około 10 lat eksploatacji nawierzchni na wybranej do analizy drodze. Nawet jeśli nawierzchnia drogi jest znacznie bardziej trwała, sumaryczna wysokość nałożonych wielu warstw oznakowania byłaby zbyt duża; jeżeli profil pionowy oznakowania przekracza około 5-6 mm, jego całość jest poddawana frezowaniu bez znaczącej emisji pyłów a usunięty materiał zostaje odpowiednio zutyli-zowany.

3. WYNIKI

3.1. BADANIA TERENOWE: TRWAŁOŚĆ UŻYTKOWA

Wyniki zestawiono w Tabl. 2 i przedstawiono w formie graficznej na Rys. 2.

2.3. FINANCIAL ANALYSIS

To provide financial assessment, the methodology used in previous works by the authors was employed [12, 22, 23]. Durability (i.e. service life) of the road markings is defined as the period or number of vehicle passes until the road markings require renewal due to loss of properties (most frequently: loss of R_L). The number of vehicle passes was adjusted to account for heavy vehicles according to the Austrian standard ONR 22440-1 [24]. This approach was adopted since it gives the possibility of comparing results from tests performed at roads carrying dissimilar traffic load and type. Whereas ONR 22440-1 accounts for greater damage to roadway caused by heavier vehicles, its other considerations, such as lane width, were disregarded for the purpose of this work. To provide a uniform framework for such calculations, it was assumed that the service life was directly proportional to the traffic load.

For the calculations it was assumed that the service life ends and the road markings require renewal when R_L decreases to $150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, as indicated by the ERF guidelines [3]. In all of the cases, service life estimates were obtained based on exponential curve fit to the R_L data [25]. To provide a cost analysis, the expense was calculated both per an application event and per series of such events – arbitrarily, per 20 million weight-adjusted vehicular passes per lane, which would mean approximately 10 years on the selected road. Even though road surface could last much longer, accumulated height profile of the applied many layers of road markings would be excessive; if the thickness of applied layers exceeds approximately 5-6 mm, the markings are mechanically removed without generation of dust and the waste is disposed appropriately.

3. RESULTS

3.1. FIELD TESTING: SERVICE LIFE

The results are listed in Table 2 and visualised in Fig. 2. Advantages provided by the combination of both the high-performance waterborne paint and the premium glass beads are obvious. It should be emphasised that traditional waterborne road marking paint cannot ensure such exceptional durability because it is not capable of holding the glass beads under the impact of vehicular traffic equally well; loss of glass beads was observed even during the initial testing [17]. The high measured standard deviations are normal in case of road markings and can serve as an indication of the differences between the portions of the transverse line that were most and least exposed to the passing traffic.

Table 2. Field test results^{*)}
 Tablica 2. Wyniki badań terenowych^{*)}

Paint Farba		Vehicle passes ^{**)} Liczba przejazdów ^{**)} [10 ⁶]	Solventborne Rozpuszczalnikowa		Waterborne high-performance Wodorozcieńczalna, wysokogatunkowa	
Glass beads Mikrokulki szklane			Standard Standardowe	Premium Wysokogatunkowe	Standard Standardowe	Premium Wysokogatunkowe
Retroreflectivity Odblaskowość R_L [mcd/m ² /lx]	initial wartość początkowa	0.1	180 (40)	574 (134)	436 (31)	1062 (115)
	6 months po 6 miesiącach	1.0	139 (26)	236 (202)	272 (48)	625 (128)
	12 months (after winter) po 12 miesiącach (po zimie)	2.3	116 (25)	155 (163)	202 (76)	509 (215)
	24 months (after 2 winters) po 24 miesiącach (po 2 zimach)	3.7	failed utrata właściwości	71 (59)	149 (89)	305 (196)
Estimated service life ^{***)} Szacowana trwałość użytkowa ^{***)}			0.9	2.3	3.5	5.9
R^2 of the estimated service life exponential curve fit R^2 krzywej wykładniczej najlepszego dopasowania przewidywanego okresu eksploatacji			0.96	0.96	0.95	0.96

^{*)} Standard deviations given in parentheses / Odchylenia standardowe podano w nawiasach okrągłych.
^{**)} Number of weight-adjusted vehicle passes / Liczba przejazdów uwzględniając poprawkę dotyczącą pojazdów ciężkich.
^{***)} Estimated service life is given in millions of weight-adjusted vehicle passes per lane until $R_L < 150$ mcd/m²/lx / Przewidywana trwałość użytkowa do momentu spadku odblaskowości do poziomu $R_L < 150$ mcd/m²/lx, podana w milionach przejazdów (uwzględniając poprawkę dotyczącą pojazdów ciężkich) na pas ruchu.

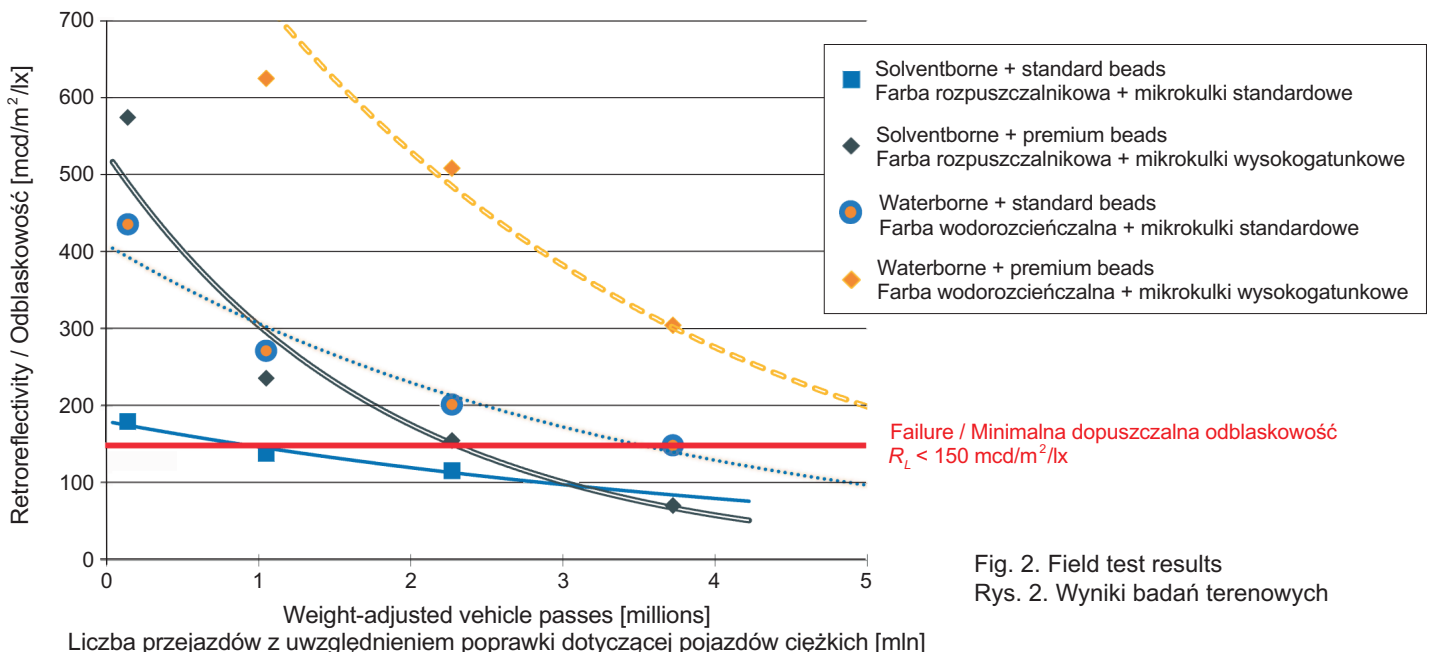


Fig. 2. Field test results
 Rys. 2. Wyniki badań terenowych

Korzyści z użycia wysokogatunkowej farby wodorozcieńczalnej z posypką mikrokulek wysokogatunkowych są oczywiste. Podkreślić należy, że tak wyjątkowej trwałości nie zapewni klasyczna wodorozcieńczalna farba drogowa, gdyż nie będzie ona w stanie tak dobrze zabezpieczyć szklanych mikrokulek przed wrywaniem przez przejeżdżające pojazdy; takie uszkodzenia zaobserwowano już na etapie początkowych badań z taką farbą [17]. Wysokie zmierzone odchylenia standardowe są typowe dla wyników pomiarów oznakowania poziomego i mogą służyć jako potwierdzenie różnic pomiędzy fragmentami linii poprzecznych najbardziej i najmniej obciążonych ruchem.

3.2. ANALIZA FINANSOWA

Ustalono, że nakłady inwestycyjne i wydatki na bieżące utrzymanie są ok. 60-krotnie niższe od kosztów związanych z dezorganizacją i wypadkami w przypadku ich braku [26]. Odpowiednie utrzymanie oznakowania drogowego wymaga więc sporych wydatków ze środków publicznych. Przedstawiona w Tabl. 3 analiza wskazuje na możliwość poczynienia znaczących korzyści w tym obszarze dzięki starannemu doborowi materiałów. Na poligonie badawczym ponownie wykazano, że zastosowanie materiałów wysokogatunkowych, pomimo znacznie wyższych nakładów początkowych, przynosi zmniejszenie kosztów w dłuższym horyzoncie czasowym [12, 22-23]. Uzyskane w ten sposób oszczędności wynoszą 17-65% pomimo wyższych o 41-194% wydatków początkowych na materiały.

Table 3. Financial calculations
Tablica 3. Analiza finansowa

Paint Farba	Solventborne Rozpuszczalnikowa		Waterborne high-performance Wodorozcieńczalna, wysokogatunkowa	
	Standard Standardowe	Premium Wysokogatunkowe	Standard Standardowe	Premium Wysokogatunkowe
Glass beads Mikrokulki szklane				
Materials cost per application [EUR/m ²] Koszt surowców na jednostkę powierzchni oznakowania	1.26	3.20 (+153%)	1.79 (+41%)	3.72 (+194%)
Labour cost per application [EUR/m ²] Koszt robocizny na jednostkę powierzchni oznakowania	0.50	0.55	0.55	0.55
Application event cost [EUR/m ²] / Koszt każdorazowego wykonania	1.76	3.75	2.34	4.27
Estimated service life (mln. passes until $R_L < 150$ mcd/m ² /lx) Przewidywana trwałość użytkowa (mln przejazdów do $R_L < 150$ mcd/m ² /lx)	0.9	2.3	3.5	5.9
Number of applications needed per 20 mln. passes Liczba znakowań na 20 mln przejazdów	23	9	6	4
Materials cost per 20 mln. passes [EUR/m ²] Koszt surowców na jednostkę powierzchni oznakowania na 20 milionów przejazdów	28.98	28.80	10.74	14.88
Applications cost per 20 mln. passes [EUR/m ²] Koszt wszystkich znakowań na 20 mln przejazdów	40.48	33.75 (-17%)	14.04 (-65%)	17.08 (-58%)

3.2. FINANCIAL ANALYSIS

The expense of installation and maintenance of horizontal road markings has been determined to be approximately sixty times lower than the cost of chaos and accidents resulting from their absence [26]. Hence, considerable public resources are allocated to their appropriate maintenance. The analysis provided in Table 3 demonstrates that it may be possible to realise financial savings in this area through careful selection of materials. At this test site it was shown again that the exceptional durability of premium road marking materials, despite their much higher initial costs, leads to lower long-term cost [12, 22-23]. Financial savings of 17-65% could be realised in the long term despite initial materials purchase expense increased by 41-194%.

4. GLASS BEAD SURFACE ANALYSIS - PRELIMINARY RESULTS

It is quite surprising that amongst the plethora of works related to road markings, glass beads are most often ignored. Amongst studies that do take them into account, usually only standard glass beads are analysed [27]. Recently, results from field comparisons of standard and premium materials have started being published [17, 28]. Whilst theoretical calculations related to a perfect surface of glass bead have been published [29, 30], the authors could not find any literature related to R_L loss due to scratching. Moreover, no analyses of intact and damaged glass bead surfaces under large magnification have been published so far.

4. ANALIZA POWIERZCHNI MIKROKULEK SZKLANYCH - WYNIKI WSTĘPNE

Zaskoczenie może budzić fakt, że pomimo tak wielu prac dotyczących problematyki oznakowania poziomego tak mało uwagi poświęcono znaczeniu mikrokulek szklanych. Jeśli nawet zostały one uwzględnione, to w dostępnych publikacjach mowa jest wyłącznie o mikrokulach standardowych [27]. Dopiero niedawno pojawiły się wyniki terenowych badań porównawczych oznakowania poziomego wykonanego z materiałów standardowych i wysokogatunkowych [17, 28]. Choć w dostępnych publikacjach [29, 30] znaleźć można obliczenia teoretyczne dotyczące idealnej powierzchni mikrokulki szklanej, autorom nie udało się znaleźć w literaturze informacji na temat utraty wskaźnika odbłaskowości R_L wskutek zarysowania powierzchni. Ponadto nie opublikowano jak dotąd wyników przeprowadzonych w dużym powiększeniu analiz powierzchni mikrokulek szklanych w stanie nienaruszonym i uszkodzonych.

Autorzy przeprowadzili ocenę wyglądu powierzchni dwóch rodzajów mikrokulek szklanych najpierw pod mikroskopem optycznym o maksymalnym powiększeniu do 20× (MDG28; Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Niemcy). W tym powiększeniu można było jedynie stwierdzić nieliczne wady fabryczne mikrokulek standardowych (Rys. 3) oraz bardzo wysoką kulistość mikrokulek wysokogatunkowych (Rys. 4), co jest zgodne z wcześniejszymi doniesieniami [31].

Dalsze badanie powierzchni mikrokulek przeprowadzono w dużo większym powiększeniu, uzyskanym pod mikroskopem elektronowym (JSM-7200F; JEOL GmbH, Freising, Niemcy). Jednym z celów tego drugiego etapu badania była analiza ilościowa powłoki obecnej na powierzchni mikrokulek szklanych. Niestety, ze względu na niewystarczającą grubość nie była możliwa jednoznaczna identyfikacja tej powłoki przy wykorzystaniu wbudowanego mikroanalizatora rentgenowskiego z dyspersją energii (EDX). Najprawdopodobniej EDX wykorzystuje zbyt dużą dawkę energii i przenika w głąb szkła, co uniemożliwia prawidłowy pomiar samej powłoki. Należy dodać, że chociaż niedawno opublikowano wyniki analizy powłoki mikrokulek szklanych wykonane przy pomocy EDX, badania te wykonano na powłoce o tak dużej grubości, że jej zastosowanie do oznakowania drogowego można uznać za nierealne [32].

Na powierzchni mikrokulki standardowej w stanie nienaruszonym (Rys. 5) stwierdzono nieznaczne wady fabryczne oraz znaczną ilość przyczepionych do powierzchni drobin przypominających cząstki pyłu, które powstały najprawdopodobniej

The appearance of the evaluated two types of glass beads was first examined by the authors at magnification of up to 20× using optical microscope (MDG28; Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Germany). Under this magnification, occasional imperfections of standard beads (Fig. 3) and very high roundness of the premium glass beads (Fig. 4) are visible, as previously reported [31], but no further information could be acquired.

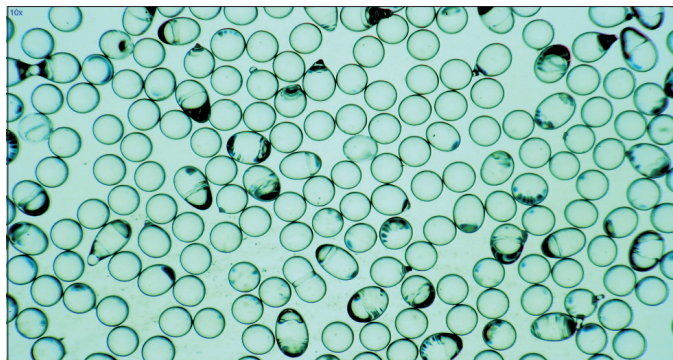


Fig. 3. Standard glass beads, fraction 630-700 μm

Rys. 3. Mikrokulki szklane standardowe, frakcja o granulacji 630-700 μm

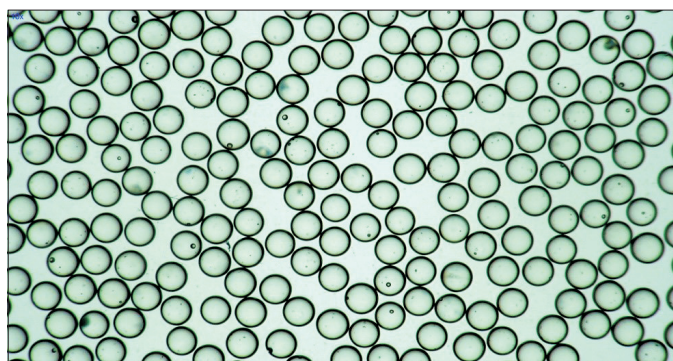


Fig. 4. Premium glass beads, fraction 630-700 μm

Rys. 4. Mikrokulki szklane wysokogatunkowe, frakcja o granulacji 630-700 μm

Additional examination of surface of these glass beads, in much higher magnification, was performed with SEM (JSM-7200F; JEOL GmbH, Freising, Germany). One of the goals was to quantify the presence of the coating on the surface of the glass beads. Unfortunately, due to thinness of the coating layer, it was impossible to positively identify it with the built-in Energy Dispersive X-ray (EDX). Apparently, the EDX uses too high energy, penetrating into the glass itself, rendering it impossible to correctly measure only the coating covering the surface. One must note that in a recent report related to the analysis of coated glass beads surface, where the presence of coating was

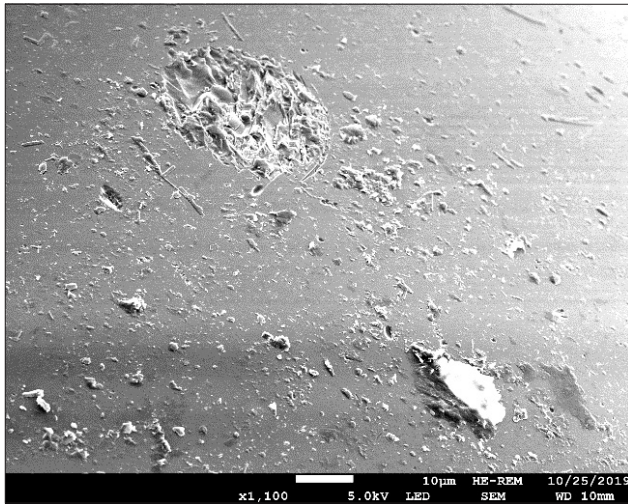


Fig. 5. Standard glass bead, intact. SEM image, magnification 1100×; visible surface imperfections and noticeable dust accumulation

Rys. 5. Standardowa mikrokulka szklana w stanie nienaruszonym. Zdjęcie pod mikroskopem elektronowym, powiększenie 1100×; widoczne wady fabryczne powierzchni i zauważalne gromadzenie się pyłu

w procesie produkcyjnym. Powierzchnia mikrokulki wysokogatunkowej (Rys. 6) okazała się być bardziej zbliżona do idealnej; obserwowano znacznie mniejszą ilość przyczepionych do niej drobin pyłu. Badaniu poddano również dwa rodzaje mikrokulek, które zostały uszkodzone w warunkach laboratoryjnych (Rys. 7 i Rys. 8). Stwierdzone uszkodzenia miały przebieg jednokierunkowy, co potwierdza poprzednio sformułowaną hipotezę dotyczącą ich źródła [20]. Zaskoczeniem był wygląd uszkodzeń, które przypominały kształtem bardziej krateru niż rysy, co wskazuje na ich powstawanie w wyniku wielokrotnych uderzeń. Obraz w większym powiększeniu (Rys. 9 i Rys. 10) potwierdza hipotezę o uderzeniowym pochodzeniu ubytków w kształcie kraterów, złożonych z mniejszych kraterków. Różnice w wyglądzie i właściwościach uszkodzonych mikrokulek szklanych są obecnie przedmiotem badań, których wynik zostanie wkrótce szczegółowo przedstawiony.

5. DYSKUSJA I WNIOSKI

W wyniku szeregu prac badawczych [11-12, 22-23, 31, 33] wykazano korzyści dla środowiska naturalnego oraz oszczędności, jakie przynosi wykonanie oznakowania poziomego przy użyciu nowoczesnych materiałów. Wnioski takie płyną również z wyników niniejszej pracy opartej na innym zestawie danych, co stanowi potwierdzenie miarodajności analizowanych materiałów i zastosowanej metodyki badawczej. W niniejszej pracy po raz pierwszy podjęto próbę

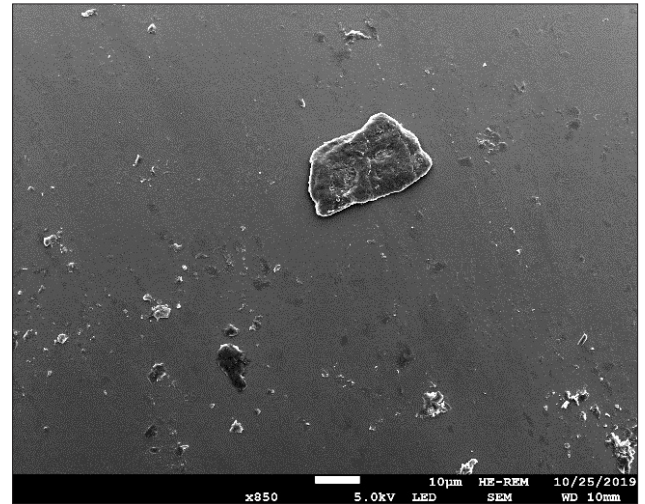


Fig. 6. Premium glass bead, intact. SEM image, magnification 850×; visible smooth surface with occasional dust accumulation

Rys. 6. Wysokogatunkowa mikrokulka szklana w stanie nienaruszonym. Zdjęcie pod mikroskopem elektronowym, powiększenie 850×; widoczna gładka powierzchnia z nieznaną ilością pyłu

pozytywnie zidentyfikowane z EDX, ilość powłoki była nie realistycznie wysoka dla zastosowania w oznakowaniu drogowym [32].

The surface of an intact standard glass bead (Fig. 5) was revealed to have small imperfections and considerable quantity of attached dust particles, apparently arising from the production process. The surface of a premium glass bead (Fig. 6) was found to be closer to perfect and the quantity of dust particles was much lower. The two types of glass beads were also examined after they had been damaged under laboratory conditions and extracted from the road marking material (Fig. 7 and Fig. 8). The visible damage is unidirectional, which confirms the previous hypothesis regarding its character [20]. Surprisingly, the damage appears to be less scratch-like and more crater-like, which suggest that it arose from repeated impacts. Under larger magnification (Fig. 9 and Fig. 10), the crater-like features, comprising smaller craters, appear to confirm the hypothesis of impact point damage. The difference in appearance and properties of damaged standard and premium glass beads is currently under investigation and shall be reported in detail in the future.

5. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In several other articles, it has been consistently shown that prolonged service life that may be achieved with modern road marking materials is associated with long-term

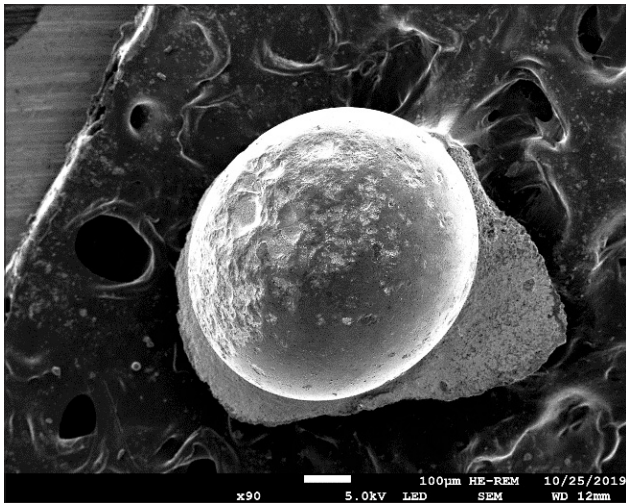


Fig. 7. Standard glass bead, damaged. SEM image, magnification 90×; visible directional damage
 Rys. 7. Uszkodzona standardowa mikrokulka szklana, Zdjęcie pod mikroskopem elektronowym, powiększenie 90×; widoczne uszkodzenia o przebiegu kierunkowym

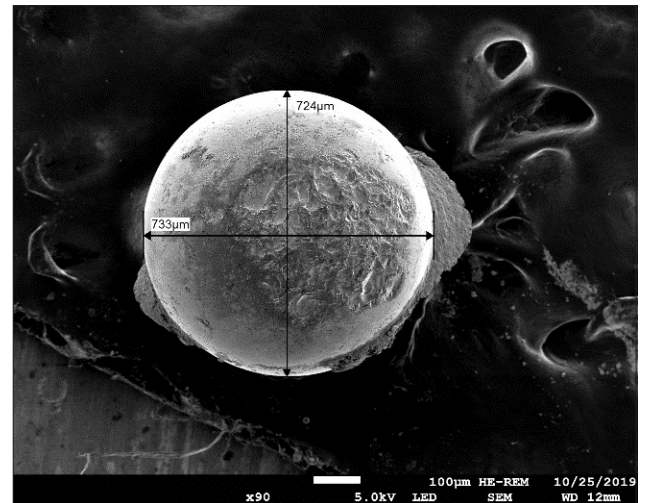


Fig. 8. Premium glass bead, damaged. SEM image, magnification 90×, visible directional damage
 Rys. 8. Uszkodzona wysokogatunkowa mikrokulka szklana, Zdjęcie pod mikroskopem elektronowym, powiększenie 90×; widoczne uszkodzenia o przebiegu kierunkowym

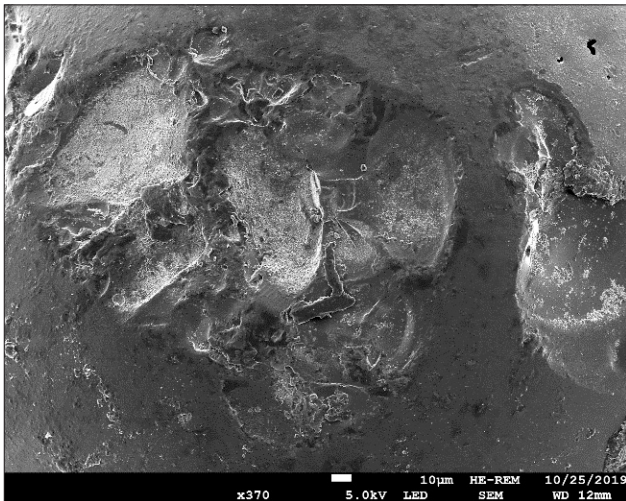


Fig. 9. Standard glass bead, damaged. SEM image close-up, magnification 370×; visible crater-like surface features
 Rys. 9. Uszkodzona standardowa mikrokulka szklana. Zbliżenie pod mikroskopem elektronowym, powiększenie 370×; widoczne uszkodzenia kształtem przypominające krater

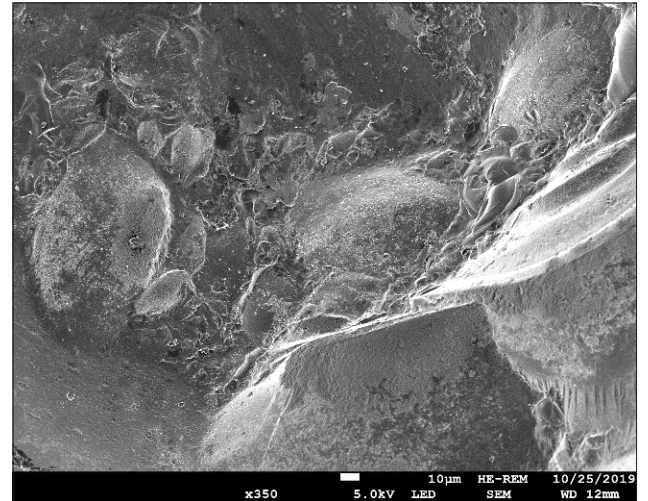


Fig. 10. Premium glass bead, damaged. SEM image close-up, magnification 350×; visible damaged surface and crater-like features
 Rys. 10. Uszkodzona wysokogatunkowa mikrokulka szklana. Zbliżenie pod mikroskopem elektronowym, powiększenie 350×; widoczne uszkodzenia powierzchni i ubytki przypominające kształtem krater

ustalenia korelacji między R_L a uszkodzeniem szklanych kulek. Choć obliczenia teoretyczne dotyczące spadku wartości R_L w wyniku zarysowań powierzchni szklanych mikrokulek przekraczają zakres niniejszego opracowania to jednak wykonane w jego ramach zdjęcia pod mikroskopem elektronowym jednoznacznie potwierdzają intensywność uszkodzeń tego typu. Zaskoczeniem był zbliżony do krateru kształt ubytków.

environmental and financial savings [11-12, 22-23, 31, 33]. The same is demonstrated herein, based on a different data set, which confirms the robustness of the analysed materials and the utilised methodology. For the first time, a correlation was sought between R_L and damage to glass beads. While theoretical calculations related to the loss of R_L caused by damage of the surface of glass beads are

W analizie cyklu życia poziomego oznakowania dróg „od kołyski do grobu” parametrem kontrolującym zgodność z zasadami zrównoważonego rozwoju jest wymagana częstotliwość odnawiania [34, 35]. Za bardzo korzystny uznać należy fakt, że system oznakowania, który okazał się najbardziej zgodny z zasadami zrównoważonego rozwoju był również najtańszy w długim horyzoncie czasowym [12, 20-21, 32-33]. Ciekawym rozwiązaniem alternatywnym mogłoby być zastosowanie, w miejsce farby, natryskiwanych mas chemoutwardzalnych. Zgodnie z deklaracją producenta charakteryzują się one relatywnie długą trwałością użytkową [35, 36]; ich ocena w podobnym teście terenowym potwierdziła te deklaracje [37]. Niedawno opublikowane wyniki z badania terenowego masy termoplastycznej o specjalnej wysokiej strukturze także potwierdziły znakomitą odbliśkowość i trwałość uzyskaną z materiałów najwyższej klasy do oznakowania drogowego [16]. Należy podkreślić, że początkowe parametry oznakowania nie zawsze przekładają się na rezultaty uzyskane w perspektywie długoterminowej [37, 38].

W ostatnim czasie istotną kwestią stał się coraz częściej poruszany problem zanieczyszczenia mikrotworzywami, a jako jedno z jego źródeł wskazano poziome oznakowanie drogowe [39]. Podawane w tym kontekście wartości są jednak najprawdopodobniej mocno przeszacowane, gdyż zanieczyszczenie tego rodzaju wystąpić może dopiero po wyrwaniu szklanych mikrokulek, czyli gdy następuje już konieczność odnowienia oznakowania ze względu na spadek wartości R_L . Wykonane zdjęcia uszkodzeń powierzchni mikrokulek wskazują, że spadek wartości R_L nie musi być wyłącznie konsekwencją ich wyrwania z warstwy oznakowania. W analizach typujących oznakowanie poziome jako jedno ze źródeł zanieczyszczeń mikrotworzywami wątpliwości budzi choćby nie uwzględnienie danych dotyczących odnowy oznakowania. Potwierdza to zastrzeżenie jakie zrobiono w jednym artykule: „przyjęto, że poziom sprzedaży farby odpowiada zużyciu farby z pominięciem farb wykorzystanych na drogi nowe i remontowane” [40], co nie jest prawidłowym założeniem dla większości przypadków. Ten problem został poruszony po wykonaniu badań terenowych [41]. Na podstawie wyników przedstawionych w niniejszej pracy można stwierdzić, że poziom zanieczyszczenia mikrotworzywami ze strony poziomego oznakowania drogowego może być znacząco zmniejszony przez zastosowanie materiałów o wydłużonej trwałości.

Nadrzędnym celem oznakowania poziomego jest zwiększenie bezpieczeństwa ruchu drogowego. Ponieważ obliczenia potwierdziły zależność między wysokim poziomem odbliśkowości a mniejszą częstotliwością wypadków [42] zastosowanie materiałów zapewniających wyższą niż standardowa wartość R_L daje dodatkową korzyść w postaci poprawy

beyond the scope of this work, SEM images demonstrated clearly that such damage was indeed extensive. A surprising feature was the crater-like appearance of the damage.

The frequency of renewal of road markings has been determined to be the controlling sustainability parameter in a cradle-to-grave life cycle assessment [34, 35]. Very advantageously, the more sustainable road marking systems have been simultaneously shown to be the least expensive from a long-term perspective [12, 20-21, 32-33]. Interesting would be inclusion in such analysis sprayed cold plastic, which can be used in lieu of paints. According to the results promoted by a manufacturer of material of this type, its service life is relatively long [35, 36]; indeed, assessment at a similar field test confirmed this claim [37]. Recently reported results from field testing of a thermoplastic road markings with a special high vertical structure also confirmed exceptionally high retroreflectivity and durability obtained with premium materials [16]. It must be emphasised that the initial performance does not always correspond to results achieved in long-term [37, 38].

Recently, pollution with microplastics has become a very important and frequently addressed topic; road markings have been identified as their significant source [39]. The given values are, however, most likely very significantly overestimated because for such pollution to occur, road markings must first become devoid of glass beads; thus, their R_L must decrease below the acceptable value, at which point they are renewed instead of being permitted to deteriorate further. The images of glass bead damage can serve as evidence that R_L can be also lost without loss of glass beads themselves. One of the key shortcomings of analyses pointing at road markings as a source of microplastics pollution is the lack of data as to when the horizontal marking is renewed; indeed, one of the reports warns that “paint sales data is assumed to equal the paint wear minus new and replacement roads” [40], which is not a correct assumption in vast majority of cases. This issue was addressed after an analysis done in the field [41]. Based on the results presented herein, microplastics pollution can be profoundly minimised through selection of highly durable materials.

The ultimate goal of using road markings is an increase in road safety. Because high R_L has been associated with lower accident frequency [42], the use of materials that can provide R_L higher than that typically achieved can be considered as an added safety benefit. Higher R_L has been consistently reported to make driving easier and drivers consider it as a safety enhancement [2, 43, 44].

bezpieczeństwa ruchu. Badania konsekwentnie potwierdzają pozytywny wpływ wyższych wartości R_L na komfort prowadzenia samochodu; kierowcy postrzegają odblaskowość oznakowania poziomego jako środek zwiększający bezpieczeństwo jazdy [2, 43, 44]. Co więcej, stwierdzono również korzystny wpływ wysokiej jakości oznakowania poziomego na przestrzeganie przez kierowców zasad ruchu drogowego [45].

Aktualny stan wiedzy wskazuje, że w dającej się przewidzieć przyszłości nie należy spodziewać się rezygnacji z oznakowania poziomego lub zastąpienia go przez inne rozwiązania i w związku z tym pozostanie ono na drogach jako niezbędny element ułatwiający prowadzenie pojazdów tradycyjnych jak również autonomicznych [22, 46]. Stanowi to uzasadnienie dla poszukiwania rozwiązań łączących maksymalną możliwą odblaskowość R_L z wysoką trwałością, przynosząc jednocześnie wymierne korzyści finansowe. W takim wypadku, jeśli firmy będą otrzymywały zamówienia na wykonanie i odnowę oznakowania poziomego obejmujące dłuższy horyzont czasowy, nie będzie problemu z wprowadzeniem najlepszych rozwiązań. Warunkiem powodzenia we wprowadzaniu przedstawionych w niniejszej pracy nowoczesnych rozwiązań jest zrozumienie technologii, współpraca i wymiana informacji między jej dostawcami, organami administracji drogowej i firmami specjalistycznymi wykonującymi poziome oznakowanie drogowe.

INFORMACJE DODATKOWE

Niniejszy artykuł został zaprezentowany w ramach XIII Międzynarodowej Konferencji Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego GAMBIT 2020, dofinansowanej przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z programu „Doskonała nauka”.

Autorzy pragną podziękować Wydziałowi Transportu i Nauk o Ruchu Drogowym na Uniwersytecie w Zagrzebiu za pomoc przy wykonywaniu oznakowania oraz zbieraniu danych, a także pracownikom chorwackiej firmy Chemosignal d.o.o. z siedzibą w Zagrzebiu za ich wkład w trakcie wykonywania próbnego oznakowania.

OŚWIADCZENIE O KONFLIKCIE INTERESÓW

Tomasz E. Burghardt i Kevin M. Wenzel są pracownikami firm produkujących materiały do wykonywania poziomych oznakowań drogowych. Wsparcie komercyjne dla niniejszego badania udzielone przez ich pracodawców ograniczyło się do przekazania próbek mikrokulek szklanych wykorzystanych w badaniach terenowych i laboratoryjnych. Przedstawione w niniejszej pracy wnioski są własnymi wnioskami autorów i nie muszą pokrywać się ze stanowiskiem ich pracodawców.

High quality of road markings has also been reported to enhance driver compliance with traffic regulations [45].

Based on the current knowledge, horizontal road markings cannot be replaced or eliminated in the foreseeable future and are necessary for both human and machine drivers [22, 46]. Therefore, a solution providing maximum R_L , high durability, and simultaneous financial savings appears desirable. In such cases, as long as the private contractors are awarded long-term marking application and renewal contracts, the best road marking solutions would enter the market without significant changes in regulations. For successful implementation of modern road marking solutions presented herein, it is necessary that the material manufacturers, road administrators, and application contractors understand the available technologies, cooperate, and exchange their knowledge.

ACKNOWLEDGEMENTS

This article was presented within the scope of the 13th International Road Safety Conference GAMBIT 2020, which was co-funded by the Science Excellence programme of the Ministry of Science and Higher Education of Poland.

The authors wish to sincerely thank the Faculty of Transport and Traffic Sciences, University of Zagreb, for the support in paint application and data collection, as well as the workers from Chemosignal d.o.o. (Zagreb, Croatia) for their effort during the test application.

CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

Tomasz E. Burghardt and Kevin M. Wenzel are employees of road marking manufacturers. Support from their employers for the work presented herein was limited to providing samples of glass beads for field and laboratory evaluation. The statements given in this article are the authors' own and do not necessarily represent the position of their employers. The results are not to serve as recommendation of any road marking system from any manufacturer, but are a demonstration of available technologies. Anton Pashkevich does not declare any conflicts of interest.

Wyniki badań nie mają stanowić rekomendacji stosowania jakiegokolwiek konkretnego systemu drogowego oznakowania poziomego dostarczanego przez któregokolwiek producenta lecz mają jedynie przedstawić aktualne możliwości technologiczne. Anton Pashkevich deklaruje brak konfliktu interesów.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *Plainis S., Murray I., Pallikaris I.*: Road traffic casualties: understanding the night-time death toll. *Injury Prevention*, **12**, 2, 2006, 125-138, DOI: 10.1136/ip.2005.011056
- [2] *Burghardt T.E., Pashkevich A., Piegza A.*: Percepcja przez kierowców poziomego oznakowania dróg o wysokiej odblaskowości. *Transport Miejski i Regionalny*, **8**, 2017, 5-10
- [3] Marking a road toward a safer future. An ERF position paper on how road markings can make our road safer. European Union Road Federation, 2015, Brussels, Belgium. Available at <https://erf.be/publications/markings-the-way-towards-a-safer-future> (accessed 15 May 2018)
- [4] *Lee H.S., Oh H.U.*: Minimum retroreflectivity for pavement markings by driver's static test response. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **6**, 2005, 1089-1099, DOI: 10.11175/easts.6.1089
- [5] *Gibbons R.B., Williams B., Cottrell B.*: The refinement of drivers' visibility needs during wet night conditions. *Transportation Research Record*, **2272**, 2012, 113-120, DOI: 10.3141/2272-13
- [6] *Pocock B.W., Rhodes C.C.*: Principles of glass-bead reflectorization. *Highway Research Board Bulletin*, **57**, 1952, 32-48
- [7] *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
- [8] EN 1423:2012. Road marking materials. Drop on materials. Glass beads, antiskid aggregates and mixtures of the two
- [9] EN 1436:2009. Road marking materials. Road marking performance for road users and test methods
- [10] *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
- [11] *Pashkevich A., Bartusiak J., Żakowska L., Burghardt T.E.*: Durable waterborne horizontal road markings for improvement of air quality. *Transportation Research Procedia*, **45**, 2020, 530-538, DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.060
- [12] *Burghardt T.E., Pashkevich A.*: Materials selection for structured horizontal road markings: financial and environmental case studies. *European Transport Research Review*, **12**, 11, 2020, DOI: 10.1186/s12544-020-0397-x
- [13] *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
- [14] *Lee Ho L., Bueno Filho J.S.D.S., Fujii W.Y., Machado C.A., Bernucci L.L.B., Quintanilha J.A.*: Pavement markings: identification of relevant covariates and controllable factors of retroreflectivity performance as a road safety measure. *Transportation Safety and Environment*, 2021, tdaa034, DOI: 10.1093/tse/tdaa034
- [15] *Goswami V., Bham G.H.*: A study of lane change frequency on a multilane freeway. In: *Ninth International Conference on Applications of Advanced Technology in Transportation*; Chicago, Illinois, United States, 13-16 August 2006, DOI: 10.1061/40799(213)127
- [16] *Burghardt T.E., Maki E., Pashkevich A.*: Yellow thermoplastic road markings with high retroreflectivity: demonstration study in Texas. *Case Studies in Construction Materials*, **14**, 2021, e00539, DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00539
- [17] *Burghardt T.E., Šćukanec 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, Croatia, 1-2 June 2017, 51-58
- [18] *Mull D.M., Sitzabee W.E.*: Paint pavement marking performance prediction model. *Journal of Transportation Engineering*, **138**, 5, 2012, 618-624, DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000360
- [19] *Mitrović A., Šćukanec A., Babić D.*: Impact of winter maintenance on retroreflection of road markings. *Proceedings of International Scientific Conference on Science and Transport Development*; Zagreb, Croatia, 12 April 2016, 119-127
- [20] *Burghardt T.E., Pashkevich A., Fiočić M., Żakowska L.*: Horizontal road markings with high retroreflectivity: durability, environmental, and financial considerations. *Advances in Transportation Studies*, **47**, 2019, 49-60
- [21] *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/rabd.021.001
- [22] *Burghardt T.E., Mosböck H., Pashkevich A., Fiočić M.*: Horizontal road markings for human and machine vision. *Transportation Research Procedia*, **48**, 2020, 3622-3633; DOI: 10.1016/j.trpro.2020.08.089
- [23] *Burghardt T.E., Pashkevich A., Mosböck H.*: Yellow pedestrian crossings: from innovative technology for glass beads to a new retroreflectivity regulation. *Case Studies on Transport Policy*, **7**, 4, 2019, 862-870, DOI: 10.1016/j.cstp.2019.07.007
- [24] ONR 22440-1. Bodenmarkierungen. Funktionsdauer – Teil 1: Allgemeines. Austrian Standards Institute, 2010, Vienna, Austria
- [25] *Abboud N., Bowman B.L.*: Cost-and longevity-based scheduling of paint and thermoplastic striping. *Transportation Research Record*, **1794**, 2002, 55-62, DOI: 10.3141/1794-07
- [26] *Miller T.R.*: Benefit-cost analysis of lane marking. *Transportation Research Record*, **1334**, 1992, 38-45
- [27] *Smadi O., Hawkins N., Aldemir-Bektas B., Carlson P., Pike A., Davies C.*: Recommended laboratory test for predicting the initial retroreflectivity of pavement markings from glass bead quality. *Transportation Research Record*, **2440**, 2014, 94-102, DOI: 10.3141/2440-12

- [28] *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, Serbia, 24-25 November 2016, 1092-1096
- [29] *Vedam K., Stoudt M.D.*: Retroreflection from spherical glass beads in highway pavement markings. 2: Diffuse reflection (a first approximation calculation). *Applied Optics*, **17**, 12, 1978, 1859-1869, DOI: 10.1364/AO.17.001859
- [30] *Grosgees T.*: Retro-reflection of glass beads for traffic road stripe paints. *Optical Materials*, **30**, 10, 2008, 1549-1554, DOI: 10.1016/j.optmat.2007.09.010
- [31] *Burghardt T.E., Pashkevich A., Fiolić M.*: Podwyższona trwałość i wysoka odbłaskowość poziomego oznakowania dróg: doświadczenia w Szwajcarii i Chorwacji. *Drogownictwo*, **73**, 6, 2018, 196-200
- [32] *Moghadam S.G., Pazokifard S., Mirabedini S.M.*: Silane treatment of drop-on glass-beads and their performance in two-component traffic paints. *Progress in Organic Coatings*, **156**, 2021, 106235. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106235
- [33] *Burghardt T.E.*: High durability high retroreflectivity solution for a structured road marking system. Proceedings of International Conference on Traffic and Transport Engineering; Belgrade, Serbia, 27-28 September 2018, 1096-1102
- [34] *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
- [35] *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
- [36] *Klein A.*: Lifecycle under the lens. *Intertraffic World, Annual Showcase*, 2012, 210
- [37] *Burghardt T.E., Babić D., Pashkevich A.*: Performance and environmental assessment of prefabricated retroreflective spots for road marking. *Case Studies in Construction Materials*, **15**, 2021, e00555, DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00555
- [38] *Harun M.H., Rosdi S., Rosmani M.*: High performance thermoplastic and cold applied plastic road markings: how long do they last? 10th Malaysian Road Conference & Exhibition, 29-31 October 2018, Selangor, Malaysia, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **512**, 2019, 012002, DOI: 10.1088/1757-899X/512/1/012002
- [39] *Bertling J., Bertling R., Hamann L.*: Kunststoffe in der Umwelt: Mikro-und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-und Energietechnik UMSICHT, 2018, Oberhausen, Germany, DOI: 10.24406/UMSICHT-N-497117
- [40] *Sherrington C., Darrah C., Hann S., Cole G., Corbin M.*: Study to support the development of measures to combat a range of marine litter sources. *Eunomia*, 2016, Bristol, United Kingdom, <https://www.eunomia.co.uk/reports-tools/study-to-support-the-development-of-measures-to-combat-a-range-of-marine-litter-sources> (accessed 10 February 2020)
- [41] *Burghardt T.E., Pashkevich A., Mosböck H.*: Microplastics originating from road markings: a significant overestimate? MICRO2020 International Conference "Fate and Impacts of Microplastics: Knowledge and Responsibilities", 23-27 November 2020, Lanzarote, Canary Islands, Spain (online)
- [42] *Avelar R.E., Carlson P.J.*: Link between pavement marking retroreflectivity and night crashes on Michigan two-lane highways. *Transportation Research Record*, **2404**, 2014, 59-67, DOI: 10.3141/2404-07
- [43] *Diamandouros K., Gatscha M.*: Rainvision: The impact of road markings on driver behaviour – wet night visibility. *Transportation Research Procedia*, **14**, 2016, 4344-4353; DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.356
- [44] *Pashkevich A., Burghardt T.E., Żakowska L., Nowak M., Koterbicki M., Piegza M.*: Highly retroreflective horizontal road markings: drivers' perception. Proceedings of International Conference on Traffic Development, Logistics and Sustainable Transport, Opatija, Croatia, 1-2 June 2017, 277-287
- [45] *Diependaele K.*: Non-compliance with pedestrian traffic lights in Belgian cities. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **67**, 2019, 230-241, DOI: 10.1016/j.trf.2016.11.017
- [46] *Mosböck H., Burghardt T.E.*: Horizontal road markings and autonomous driving: back from the future. In: 37th Annual Southern African Transport Conference, Pretoria, South Africa, 9-12 July 2018, 557-568, <http://hdl.handle.net/2263/69562>