



TOMASZ E. BURGHARDT¹⁾
 ANTON PASHKEVICH²⁾
 JACEK BARTUSIAK³⁾

SOLUTION FOR A TWO-YEAR RENEWAL CYCLE OF STRUCTURED ROAD MARKINGS

ROZWIĄZANIE ZAPEWNIAJĄCE DWULETNI CYKL ODNOWY STRUKTURALNEGO OZNAKOWANIA POZIOMEGO

STRESZCZENIE. Oznakowanie poziome stanowi niezbędny element wspomagający utrzymanie pojazdu z kierowcą w obrębie drogi. Ze względu na ograniczoną widzialność nocą, kiedy ryzyko oraz skutki wypadków są najwyższe, oznakowanie poziome drogi powinno być pokryte mikrokulkami szklanymi odbijającymi światło reflektorów w kierunku nadjeżdżającego pojazdu. Odnowę oznakowania grubowarstwowego strukturalnego, które utraciło właściwości odbłaskowe, ale zachowało względnie nienaruszoną strukturę, przeprowadza się poprzez nałożenie materiałów cienkowarstwowch. Na podstawie badania terenowego wykazano, że wybór wysokiej jakości mikrokulek szklanych znacząco podnosi trwałość odnowionego oznakowania, a zastosowanie wysokiej jakości farby wodorozcieńczalnej dodatkowo wydłuża jego okres eksploatacji. Podczas gdy standardowy system oparty na farbie rozpuszczalnikowej i typowych mikrokulkach szklanych przestał spełniać wymagania już po jednej zimie, zastosowanie systemu oznakowania wysokiej jakości pozwoliło co najmniej podwoić okres eksploatacji. Wydłużenie okresu między odnowami oznakowania poziomego przekłada się na 50% oszczędności w zużyciu materiałów, ograniczenie emisji lotnych związków organicznych o 50-97% oraz obniżenie kosztów w długim okresie o 5-26%.

SŁOWA KLUCZOWE: bezpieczeństwo ruchu drogowego, farba wodorozcieńczalna, mikrokulki szklane, ochrona środowiska, odbłaskowość, poziome oznakowanie drogowe, utrzymanie infrastruktury.

ABSTRACT. Road markings are a necessary safety feature that guides drivers. For visibility in darkness, when accident risk and severity are the highest, road markings must be reflectorised with glass beads to be visible when vehicle headlights shine on them. Renewal of thick-layer structured road markings that have lost retroreflectivity but have retained the structure mostly intact is performed through application of thin-layer paint coatings. Based on a field experiment, it was demonstrated that selection of premium glass beads profoundly extends the durability of the renewed markings, which could be further enhanced through the use of high-performance waterborne paint. Whereas the standard system based on solventborne paint and typically used glass beads failed after a single winter, the use of premium road marking system at least doubled the service life. The extended road marking service life translates to 50% savings in material consumption, 50-97% lower emissions of volatile organic compounds, and a decrease in long-term financial expense by 5-26%.

KEYWORDS: environmental protection, glass beads, infrastructure maintenance, retroreflectivity, road markings, road safety, waterborne paint.

DOI: 10.7409/rabdim.021.001

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⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Katedra Systemów Transportowych; jacek.bartusiak@wp.pl

1. WPROWADZENIE

1.1. INFORMACJE OGÓLNE

Drogowe oznakowanie poziome, wynalezione ponad sto lat temu, jest aktualnie wszechobecne na drogach. Pomaga ono kierowcom utrzymać właściwą ścieżkę pojazdu w obrębie przekroju drogi [1, 2], zwłaszcza gdy inne wizualne punkty odniesienia są ograniczone. Jest ono szczególnie istotne w nocy na nieoświetlonych odcinkach dróg, gdyż w takich warunkach liczba i ciężkość wypadków są nieproporcjonalnie wysokie w stosunku do natężenia ruchu [3]. W związku z tym oznakowanie powinno być pokryte mikrokulkami szklanymi odbijającymi światło reflektorów w kierunku nadjeżdżającego pojazdu. Należy rozpatrywać je jako system, składający się z warstwy podstawowej (barwnej) oraz warstwy mikrokulek szklanych (odblaskowej) [4]. Jedynie współpraca tych dwóch warstw, przy właściwym osadzeniu mikrokulek [5], zapewnia funkcjonalne oznakowanie drogi. Oznakowanie poziome traci pożądane właściwości pod wpływem oddziaływania ruchu oraz zimowych czynności utrzymaniowych, co przyczynia się do konieczności częstych remontów.

Artykuł przedstawia wyniki badania terenowego czterech cienkowarstwowych systemów stosowanych do odnowy grubowarstwowego oznakowania strukturalnego, które utraciło właściwości odblaskowe, ale zachowało nienaruszoną strukturę. Jak wykazały wyniki badania, wybór farby oraz mikrokulek szklanych ma znaczący wpływ na trwałość (okres eksploatacji) warstwy naniesionej w ramach odnowy. Dzięki zastosowaniu materiałów wysokiej jakości okres eksploatacji może być podwojony w porównaniu z systemem stosowanym tradycyjnie. Przedstawiono kalkulację korzyści środowiskowych i finansowych.

Zdolność oznakowania do powrotnego odbicia światła w kierunku źródła (retrorefleksyjność) ma tak kluczowe znaczenie, że większość specyfikacji odnoszących się do oznakowania określa minimalną wartość powierzchniowego współczynnika odblasku R_L . Ostatnie zalecenia Federacji Drogowej Unii Europejskiej (ERF) w tym względzie określają dla wszystkich dróg wymóg $R_L > 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ [6], co jest zgodne z treścią wcześniejszej publikacji przygotowanej na podstawie wizualnej oceny oczekiwań kierowców [7]. Dla wyników przedstawionych tu badań przyjęto minimalną dopuszczalną wartość R_L równą $200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, to jest minimum wymagane przez zarządcę dla oznakowania nowego na drodze, na której prowadzono badania. Należy zaznaczyć, iż w Polsce istnieją rozbieżności między wymaganiami zarządców dróg a wymogami ustawowymi w tym względzie [8]. Gdy R_L spadnie poniżej wymaganego minimum, oznakowanie musi zostać odnowione.

1. INTRODUCTION

1.1. BACKGROUND

Horizontal road markings, since their introduction over a century ago, became ubiquitous on modern roads. Their presence helps drivers maintain the appropriate travel path [1, 2], especially when other visual cues are limited. They are particularly important on unlit roads at night, under which conditions the number of accidents and their severity are disproportionately high in relation to the traffic load [3]. Therefore, road markings must be reflectorised with glass beads, which provide retroreflectivity when illuminated by vehicle headlights. Markings should be considered as systems, comprising of the base (colour) layer and the glass beads (retroreflective) layer [4]. Only co-operation of these two layers, with appropriate embedment of the glass beads [5], yields a functional road marking. Horizontal road markings lose their properties due to damage from vehicular traffic and winter maintenance activities, which necessitates their frequent renewals.

The paper describes the results of a field test of four thin-layer road marking systems used for renewal of structured thick-layer markings that have lost retroreflectivity, but have retained the structure intact. As demonstrated by the results, the choice of paint and glass beads profoundly influence the durability (i.e. the service life) of the renewal layer, which can be doubled with the use of premium materials as compared to the traditional system. Environmental and financial benefits are calculated.

Retroreflectivity is such a critical property that the majority of road marking specifications require a certain minimum coefficient of retroreflected luminance R_L . The most recent recommendation from the European Union Road Federation for all roads is $R_L > 150 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ [6], which agrees with an earlier report based on a visual assessment of the needs of the drivers [7]. For the field test results provided herein, the minimum acceptable R_L was $200 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, which is the minimum required by the road administrator for new markings for the class of the road on which the test was performed. A discrepancy should be noted between the requirements of the road administrators and the statutory demands in Poland [8]. Once R_L decreases below the required minimum, markings must be renewed.

Road safety level in Poland, where the presented study was performed, is amongst the lowest in European Union countries. In 2019 there were as many as 30,288 accidents in which 2,909 people were killed and 35,477 injured; in

Poziom bezpieczeństwa ruchu drogowego w Polsce – gdzie przeprowadzono przedstawione badania – należy do najniższych spośród krajów Unii Europejskiej. W 2019 doszło aż do 30288 wypadków, w których było 2909 zabitych i 35477 rannych; ponadto zgłoszono 455454 kolizji drogowych, których konsekwencje ograniczyły się do strat materialnych [9]. Szczególnie niepokojący jest fakt, iż po wielu latach stopniowego spadku liczby wypadków i ofiar śmiertelnych, od roku 2015 ten pożądaný trend ustał: od redukcji liczby zabitych o 29,9% między 2011 r. a 2015 r., do zaledwie 1,0% między 2015 r. a 2019 r. Zastój ten nastąpił pomimo oddawania do użytku nowych odcinków autostrad i dróg ekspresowych: między 2015 r. a 2019 r. długość sieci dróg szybkiego ruchu w Polsce wzrosła o 1170 km (o 37,4%), tj. z 3131 km do 4301 km. Przedstawiona została propozycja oceny „zwrotu bezpieczeństwa z inwestycji” w przypadku nowych inwestycji drogowych, uwzględniająca między innymi jakość oznakowania poziomego [10]. W związku z powyższym pogłębiona analiza czynników wpływających na jakość, widzialność i trwałość oznakowania może stanowić znaczący wkład w poprawę bezpieczeństwa ruchu drogowego.

1.2. MATERIAŁY UŻYWANE DO ZNAKOWANIA I ICH TRWAŁOŚĆ

Grubowarstwowe oznakowanie strukturalne – zazwyczaj masy termoplastyczne lub masy chemoutwardzalne na zimno – aplikuje się w regularnych lub nieregularnych wzorach, stosując grubość nawet 4-5 mm (wydatek materiału może wynosić około 2,0-3,0 kg/m²). Masy te są stosunkowo trwałe, lecz po 2-4 latach eksploatacji [11, 12] dochodzi do utraty R_L i niezbędne jest odnowienie oznakowania. W tym celu zazwyczaj stosuje się materiały cienkowarstwowe, takie jak farby rozpuszczalnikowe bądź wodorozcieńczalne, nakładane warstwą około 300-400 μm (tj. około 0,5-0,6 kg/m²), ze względu na korzystny stosunek uzyskanego efektu do ceny, choć znane są również alternatywne rozwiązania polegające na natrysku cienkich warstw mas chemoutwardzalnych na zimno lub termoplastycznych [12]. Odnowa przez ponowne nałożenie materiału grubowarstwowego w celu uzyskania kolejnych 2-4 lat okresu eksploatacji nie byłaby ani ekonomiczna, ani ekologiczna; ponadto konieczne byłoby usunięcie starego oznakowania ze względu na nadmierną łączną jego grubość. Każda odnowa oznakowania związana jest z nakładami finansowymi, które obciążają podatników, ponadto negatywnie wpływa na środowisko ze względu na zużycie zasobów. Dwie niezależnie opracowane oceny kompletnego cyklu życia różnych cienkowarstwowych systemów znakowania poziomego wykazały, że decydującym parametrem nie jest rodzaj materiałów, lecz trwałość wykonanych

addition, 455,454 road collisions with property damage only were reported [9]. Particularly troubling is the fact that after many years of gradual decrease in the numbers of accidents and fatalities, in 2015 the desirable trend came to a standstill: from 29.9% decrease in the number of fatalities between 2011 and 2015 to only 1.0% decrease between 2015 and 2019. The stagnation occurred in spite of opening of new highways: between 2015 and 2019 their network length in Poland increased by 1,170 km (37.4%), from 3,131 km to 4,301 km. A new methodology has been proposed to evaluate a “safety return on investment” of the new road projects, where the quality of road markings is included [10]. Therefore, an in-depth analysis of the factors affect in groad marking quality, visibility and durability may contribute considerably to road safety improvement.

1.2. ROAD MARKING MATERIALS AND DURABILITY

Thick-layer structured road markings, usually cold plastic or thermoplastic masses, are applied in either irregular or regular patterns at thicknesses reaching even 4-5 mm (applied material weights can be approximately 2.0-3.0 kg/m²). These masses are relatively durable, but after 2-4 years of usage [11, 12], their R_L is lost and a renewal is required. For the renewal, thin-layer materials such as solventborne or waterborne paints, applied at 300-400 μm approximately (i.e. about 0.5-0.6 kg/m²), are typically used due to their reasonable price to performance balance, even though sprayed cold plastic and sprayed thermoplastic are known alternatives [12]. Renewal with another layer of thick-layer materials to provide another 2-4 years of service would be neither economical nor environmentally friendly; in addition, removal of the old markings would be necessary to avoid excessive thickness. Each renewal is associated with financial expenses that burden the taxpayers. It also negatively affects the environment due to consumption of resources. Two independently prepared cradle-to-grave life cycle assessments performed for various thin-layer horizontal road marking systems have shown that the controlling parameter is not the type of the materials, but the durability of the markings [13, 14]. Therefore, search for a more durable road marking system is warranted.

Over the years, several researchers from the United States have been reporting on durability of various road marking materials, with the intention of correlating it with the material type, winter maintenance events, lane location, traffic load, etc. [11, 15]. Assessment under European conditions

znakowań [13, 14]. A zatem uzasadnione jest poszukiwanie bardziej trwałego systemu oznakowań drogowych.

Na przestrzeni lat kilku badaczy ze Stanów Zjednoczonych publikowało dane o trwałości różnorodnych materiałów stosowanych do oznakowań poziomych, starając się skorelować je z rodzajem materiału, zimowymi czynnościami utrzymaniowymi, lokalizacją pasa ruchu, natężeniem ruchu itp. [11, 15]. Niedawno podobne oceny zostały opublikowane również w odniesieniu do warunków europejskich [16]. Niemniej jednak, we wszystkich wspomnianych pracach stosowano standardowe mikrokulki szklane o współczynniku załamania światła RI równym 1,5. Wykonano zaledwie kilka eksperymentów na małą skalę, które pokazały, że lepsze wyniki można osiągnąć zwiększając RI [17, 18]. Chociaż badania wykazały również, że mikrokulki szklane większe od typowo stosowanych mogą wpłynąć korzystnie na trwałość oraz zachowanie R_L [19, 20], nie przedstawiono wyników dalszych badań w tym względzie. Opublikowane nowsze wyniki europejskich badań terenowych, w których testowano materiały standardowe oraz materiały o podwyższonej jakości – zarówno farby, jak i mikrokulki szklane – zawierają ich ocenę porównawczą. Wielokrotnie wykazano w nich, iż w przypadku oznakowań cienkowarstwowych czynnikiem decydującym o trwałości był materiał warstwy podstawowej, zaś wybór mikrokulek szklanych był niemal równie istotny [21, 22]. Takie same prawidłowości stwierdzono w przypadku grubowarstwowych oznakowań strukturalnych [23-25]. Niemniej jednak, według wiedzy autorów nie opublikowano dotąd żadnych raportów dotyczących oceny odnowy oznakowania strukturalnego, które utraciło R_L , co oznacza, że niniejszy artykuł jest pierwszą publikacją odnoszącą się do tego niezwykle ważnego zagadnienia praktycznego.

2. BADANIE TERENOWE

Odcinek drogi do badań został wyznaczony przez zarządcę. Był to jednojezdniowy odcinek drogi wojewódzkiej o długości 23,8 km w okolicy Kielc, o szerokości przekroju 6,5-6,8 m, bez pobocza asfaltowego, przenoszący średnioroczne dzienne natężenie ruchu $AADT$ w zakresie 4072-6198 pojazdów, w tym 254-427 pojazdów ciężkich (tj. o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3500 kg), co po korekcie natężenia względem masy pojazdów według normy austriackiej ONR 22440-1 [26] przekłada się na skorygowane dzienne natężenie ruchu 7057-7920 pojazdów. Nawierzchnia asfaltowa drogi była eksploatowana od czterech lat i znajdowała się w stanie bardzo dobrym. Pierwotnie była oznakowana masą chemo-utwardzalną na zimno o strukturze nieregularnej, która w ciągu czterech lat utraciła R_L , zaś odnowa prowadzona w ramach badania stanowiła pierwszy jej remont. Namalowane

has been recently reported as well [16]. However, in all these works, standard glass beads with refractive index RI of 1.5 were utilised. Only a few small-scale demonstration experiments were performed, which have shown that better results could be obtained with the increase in RI [17, 18]. Studies have also shown that larger glass beads than those typically utilised could be beneficial for maintaining durability and R_L [19, 20], but no follow-up results were provided. More recently, outcome of field research in Europe has been reported, where standard and premium road marking materials – both paints and glass beads – were assessed side-by-side. It has been repeatedly shown that in the case of thin-layer markings the choice of material for the base layer was critical, but the selection of glass beads was almost equally important [21, 22]. Similar results have been reported in the case of thick-layer structured materials [23-25]. However, the authors could not find any reports from evaluations concerning renewals of structured road markings that have lost their R_L , which makes this article the first to address this very important practical topic.

2. FIELD TEST

The test site was assigned by a road administrator. It was a 23.8-km-long single-carriageway voivodeship road near Kielce, Poland, with pavement width of 6.5-6.8 m, without asphalt shoulders, carrying Annual Average Daily Traffic $AADT$ of 4,072-6,198 vehicles, including 254-427 heavy vehicles (i.e. over 3,500 kg gross weight rating), corresponding to weight-adjusted daily traffic load of 7,057-7,920 vehicles when calculated according to the Austrian standard ONR 22440-1 [26]. The asphalt pavement of the road had been in service for four years and was in very good condition. The original markings made with randomly structured cold plastic had lost their R_L and the test application was the first renewal. Edge and centre lines were marked (generally, 12 cm wide), but due to the presence of kerbs in some areas, passing and no-passing zones, and driveways, which in Poland are marked differently, it was not a continuous uniform marking. The overall marked area was 2,688 m², comprising 1,810 m² of centre markings and 878 m² of edge markings.

All of the marking materials, described in Table 1, were purchased commercially. They met all of the requirements of EN 1423 [27] and EN 1436 [28] standards. The contents of volatile organic compounds VOC of paints are given based on the current regulations and definitions of the European Union law [29], according to the safety data sheets of the products; in the case of waterborne

były linie środkowe i krawędziowe (o typowej szerokości 12 cm), lecz ze względu na występowanie krawężników, odcinków z zakazami wyprzedzania oraz zjazdów na posejsje, które w Polsce znakowane są inaczej, oznakowanie na całym odcinku nie było identyczne i ciągłe. Całkowita powierzchnia oznakowania wynosiła 2688 m², a składała się na nią 1810 m² linii środkowych oraz 878 m² linii krawędziowych.

Wszelkie materiały do znakowania, opisane w Tabl. 1, zostały zakupione na zasadach rynkowych. Spełniały one wszystkie wymogi norm EN 1423 [27] oraz EN 1436 [28]. Zawartość lotnych związków organicznych *VOC* w farbach podano zgodnie z aktualnymi przepisami i definicjami prawa Unii Europejskiej [29], na podstawie danych z kart charakterystyki. W przypadku farby wodorocieńczalnej uwzględniono również właściwe ilości dodatku hydroksyestru, typowo stosowanego w roli koalescenta. Potencjał tworzenia ozonu *OFP* podano według obliczeń przeprowadzonych na podstawie łącznej emisji gazów organicznych, jako że wcześniejsze badania pokazały, iż wartość ta jest bardziej reprezentatywna i wiarygodna niż nominalna emisja *VOC*, która może różnić się w zależności od przyjętej definicji [30, 31]. Różnice *OFP* względem poprzednich analiz [30, 32] wynikły z zastosowania w niniejszym badaniu innej farby niż ta zastosowana w omówionych systemach modelowych. Ceny jednostkowe na potrzeby kalkulacji finansowych uzyskano z ankiety, kierując do polskich sprzedawców hurtowych i detalicznych zapytania ofertowe o wycenę 1 tony różnych materiałów stosowanych do znakowań [32]. Choć ceny mogą różnić się znacznie ze względu na złożone uwarunkowania rynkowe, ogólne trendy powinny pozostać niezmiennie.

Wybrane lokalizacje w obrębie odcinka testowego były poddawane przez autorów okresowym kontrolom z zastosowaniem typowego retroreflektometru ręcznego (ustawionego na geometrię 30 m, zgodnie z normą EN 1436 [28]). Dokonywano minimum siedmiu pomiarów w każdej lokalizacji. Miejsca kontroli ustalono na odcinkach poza łukami poziomymi i pionowymi, celem zapewnienia należytego bezpieczeństwa zespołu oraz uniknięcia istotnych zakłóceń ruchu drogowego. Oprócz powierzchniowego współczynnika odbłasku R_L mierzono również współczynnik luminacji w świetle rozproszonym Q_d oraz wskaźnik szorstkości *SRT*. Wartości dwóch ostatnich parametrów zawsze spełniały wymagania; nie będą one omawiane poniżej. Zadowolające wartości *SRT* osiągnięto bez użycia kruszywa antypoślizgowego, dzięki pierwotnej szorstkości odnawianej powierzchni.

paint, appropriate quantity of a typically used hydroxy-ester coalescent was included. Ozone formation potential *OFP* is provided based on calculations performed on total organic gases, since previous research has shown it to be more representative and reliable than the nominal *VOC* emissions, which can vary depending on the used definition [30, 31]. Differences in *OFP* between this study and the previous analyses [30, 32] arose from the fact that different paint was used for this test than the one utilised for the discussed model systems. For financial calculations, the unit prices were obtained from a survey of Polish wholesalers and retailers of road marking materials queried for price quotation for 1 tonne of various materials [32]. Even though the prices may differ substantially due to complex market relations, the general trends should remain the same.

The test site was inspected by the authors periodically with a typical handheld retroreflektometer (set to a 30-metre geometry, according to the EN 1436 standard [28]) in selected locations, with a minimum of 7 data points collected per location. The measurement locations were established at straight and flat stretches, where appropriate safety of the measuring crew could be maintained without noticeable traffic obstruction. In addition to R_L , the luminance coefficient under diffuse illumination Q_d and skid resistance *SRT* were measured. Their values met the requirements consistently and shall not be discussed herein. Sufficient *SRT* was obtained without anti-skid particles, owing to the roughness of the initial structure.

3. RESULTS

The collected retroreflectivity results are presented in Table 2 (standard deviations are given in parentheses) and Fig. 1. The initial results suggested moderate advantages of using premium glass beads. However, after winter, it became clear that the standard road marking system failed, with R_L decreasing below 200 mcd/m²/lx, while other systems met the requirements. The use of mixed standard/premium (30%) glass beads in solventborne paint led to an increase in the retained R_L to 200 mcd/m²/lx at the centre and 328 mcd/m²/lx at the edge lines. The waterborne paint reflectorised with the same mix of glass beads performed similarly, with both edge and centre lines exhibiting approximately 250 mcd/m²/lx. With a mix containing 80% of premium glass beads, waterborne paint maintained R_L of 309 mcd/m²/lx after winter at the centre line, which clearly justifies a claim of at least two-year durability and strongly suggests a three-year satisfactory

Table 1. Materials
 Tablica 1. Materiały

Material / Materiał	Unit price [EUR/kg] Cena jednostkowa	Description, characteristics, amounts applied at the test section Opis, charakterystyka, ilości nałożone na odcinku testowym
Solventborne paint Farba rozpuszczalnikowa	1.72	White high-solids road marking paint, acrylic resin; $VOC=24\%$ (384 g/dm^3), includes 8% toluene, $OFP=408\text{ g O}_3/\text{kg}$. Applied at 0.5 kg/m^2 Biała farba o wysokiej zawartości substancji stałych przeznaczona do oznakowań drogowych, żywica akrylowa; $VOC=24\%$ (384 g/dm^3), zawartość toluenu 8%, $OFP=408\text{ g O}_3/\text{kg}$. Nałożono $0,5\text{ kg/m}^2$
Waterborne paint Farba wodorozcieńczalna	2.59	White high-performance waterborne paint, acrylic resin capable of partial self-crosslinking; 23% of water, $VOC=0.7\%$ (41 g/dm^3), $OFP=21\text{ g O}_3/\text{kg}$. Applied at 0.5 kg/m^2 Biała farba wodorozcieńczalna wysokiej jakości, żywica akrylowa zdolna do częściowego samosieciowania; 23% wody, $VOC=0,7\%$ (41 g/dm^3), $OFP=21\text{ g O}_3/\text{kg}$. Nałożono $0,5\text{ kg/m}^2$
Standard glass beads Standardowe mikrokulki szklane	0.58	Made from recycled materials, refractive index RI of 1.5 (EN 1423 Class A), heavy metals and metalloids content below 200 mg/kg (EN 1423 Class 1), roundness $>80\%$; available in sizes of $100\text{-}850\text{ }\mu\text{m}$. Typically achieved maximum R_L in white paint: $350\text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Applied was material coated for adhesion, without anti-skid additives, size $100\text{-}600\text{ }\mu\text{m}$, dropped-on at approx. 0.4 kg/m^2 Wyprodukowane z materiałów z recyklingu, współczynnik załamania światła RI 1,5 (klasa A wg EN 1423), zawartość metali ciężkich i półmetali poniżej 200 mg/kg (klasa 1 wg EN 1423), kulistość $>80\%$; dostępne średnice $100\text{-}850\text{ }\mu\text{m}$. Typowo osiągnięta maksymalna wartość R_L w farbie białej: $350\text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Zastosowano materiał pokryty powłoką adhezyjną, bez dodatku materiału uszorstniającego, o granulacji $100\text{-}600\text{ }\mu\text{m}$, nałożony przez posypywanie ilością ok. $0,4\text{ kg/m}^2$
Premium glass beads Mikrokulki szklane wysokiej jakości	6.63 ⁾	Made from virgin raw materials, RI 1.6-1.7 (EN 1423 Class A), heavy metals and metalloids content below 200 mg/kg (EN 1423 Class 1), roundness $>90\%$; available in sizes of $300\text{-}1,000\text{ }\mu\text{m}$. Typically achieved maximum R_L in white paint: $1,000\text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Applied was material coated for adhesion, without anti-skid additives, size $212\text{-}850\text{ }\mu\text{m}$, dropped-on at approx. 0.4 kg/m^2 . Mixtures with equally-sized standard beads contained 30% or 80% of the premium material Wyprodukowane z surowców nowych, RI 1,6-1,7 (klasa A wg EN 1423), zawartość metali ciężkich i półmetali poniżej 200 mg/kg (klasa 1 wg EN 1423), kulistość $>90\%$; dostępne średnice $300\text{-}1000\text{ }\mu\text{m}$. Typowo osiągnięta maksymalna wartość R_L w farbie białej: $1000\text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Zastosowano materiał pokryty powłoką adhezyjną, bez dodatku materiału uszorstniającego, o granulacji $212\text{-}850\text{ }\mu\text{m}$, nałożony przez posypywanie ilością około $0,4\text{ kg/m}^2$. Mieszanki z mikrokulkami standardowymi zawierały 30% lub 80% materiału wysokiej jakości
⁾ For application, mixtures of premium and standard type glass beads were used. Price is provided for pure premium glass beads Do posypywania stosowano mieszanki mikrokulek standardowych oraz wysokiej jakości. Podana cena dotyczy samego materiału wysokiej jakości		

3. WYNIKI

Zebrane wyniki odbłaskowości przedstawiono w Tabl. 2 (odchylenia standardowe podano w nawiasach) oraz na Rys. 1. Pierwsze pomiary sugerowały umiarkowane korzyści płynące z zastosowania mikrokulek szklanych o podwyższonej jakości. Niemniej jednak, po okresie zimowym stało się jasne, że standardowy system oznakowania utracił pożądane właściwości (jego R_L spadł poniżej $200\text{ mcd/m}^2/\text{lx}$), podczas gdy inne systemy nadal spełniały wymagania. Zastosowanie mieszanki mikrokulek o standardowej i podwyższonej jakości (30%) w farbie rozpuszczalnikowej zaowocowało zachowaniem wyższego współczynnika R_L : $200\text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ na linii środkowej oraz $328\text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ na liniach krawędziowych. Farba

performance. The higher measured R_L at the centre line is surprising, because this area is exposed to many more wheel passes than the edge lines. It was assumed that natural phenomena like dirt accumulation lowered the R_L at the edge, which was confirmed by Qd values. A year after renewal, R_L further deteriorated, but to a much lesser extent than after winter. These results should be confronted with the provisions of the Polish technical requirements published in the ordinance [8], which claims that only 1-year service life can be expected from a waterborne road marking paint. Clearly, the technology of waterborne road marking materials has improved significantly and adjust-

wodorozcieńczalna o odbłaskowości zapewnionej przez tę samą mieszankę dwóch rodzajów mikrokulek osiągnęła zbliżone wyniki – zarówno linie środkowe, jak i krawędziowe zachowały R_L około $250 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$. Przy zastosowaniu mieszanki ze znaczną przewagą (80%) mikrokulek szklanych o podwyższonej jakości, system z farbą wodorozcieńczalną zachował na linii środkowej R_L wynoszący $309 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$ po okresie zimowym, co pozwala w uzasadniony sposób stwierdzić trwałość dwuletnią, a nawet sugeruje znaczne prawdopodobieństwo osiągnięcia zadowalających parametrów w okresie trzech lat. Wyższa wartość współczynnika R_L zmierzona na linii środkowej jest zaskakująca, ponieważ środek jezdni narażony jest na wielokrotnie wyższą liczbę przejazdów kół niż linie krawędziowe. Założono, że na obniżenie R_L na liniach krawędziowych wpływ miały zjawiska naturalne, takie jak odkładanie się pyłu i błota, co potwierdziły pomiary Q_d . W okresie między pomiarami dokonanymi po zimie a upływem roku od odnowienia oznakowania wartości R_L również się obniżyły, lecz w znacznie mniejszym stopniu niż w ciągu okresu zimowego. Wyniki te należy zestawić z zapisami polskich warunków technicznych opublikowanych w rozporządzeniu [8], wedle których po oznakowaniu farbą wodorozcieńczalną należy się spodziewać wyłącznie rocznego okresu eksploatacji. Jak widać, technologia materiałów wodorozcieńczalnych do znakowań drogowych została już udoskonalona w tak znacznym stopniu, że uzasadnione byłoby zrewidowanie zapisów prawnych w celu odzwierciedlenia aktualnego stanu rozwoju nowoczesnych technologii oraz wsparcia ich stosowania [33].

Table 2. Retroreflectivity test results (standard deviations in parentheses)

Tablica 2. Wyniki badania odbłaskowości (w nawiasach odchylenia standardowe)

Paint / Farba	Solventborne / Rozpuszczalnikowa		Waterborne / Wodorozcieńczalna	
	Standard Standardowe	30% premium materiału wysokiej jakości	30% premium materiału wysokiej jakości	80% premium materiału wysokiej jakości
Test section length [m] Długość odcinka badawczego	2300	3900	4100	5900; Centre line / Linia środkowa: 13500
R_L [mcd/m ² /lx] Initial / wartość początkowa	248 (40)	484 (80)	298 (82)	413 (143)
R_L [mcd/m ² /lx] After winter (centre lines) Po zimie (linie środkowe)	112 (9)	200 (30)	248 (52)	309 (66)
R_L [mcd/m ² /lx] After winter (edge lines) Po zimie (linie krawędziowe)	176 (18)	328 (33)	253 (15)	280 (47)
R_L [mcd/m ² /lx] 1 year (centre lines) Po roku (linie środkowe)	101 (18)	174 (50)	259 (101)	205 (38)
R_L [mcd/m ² /lx] 1 year (edge lines) Po roku (linie krawędziowe)	160 (36)	250 (21)	233 (44)	227 (61)

ment in the law is warranted to keep it up to date with the novel ecological technologies and to support their use [33].

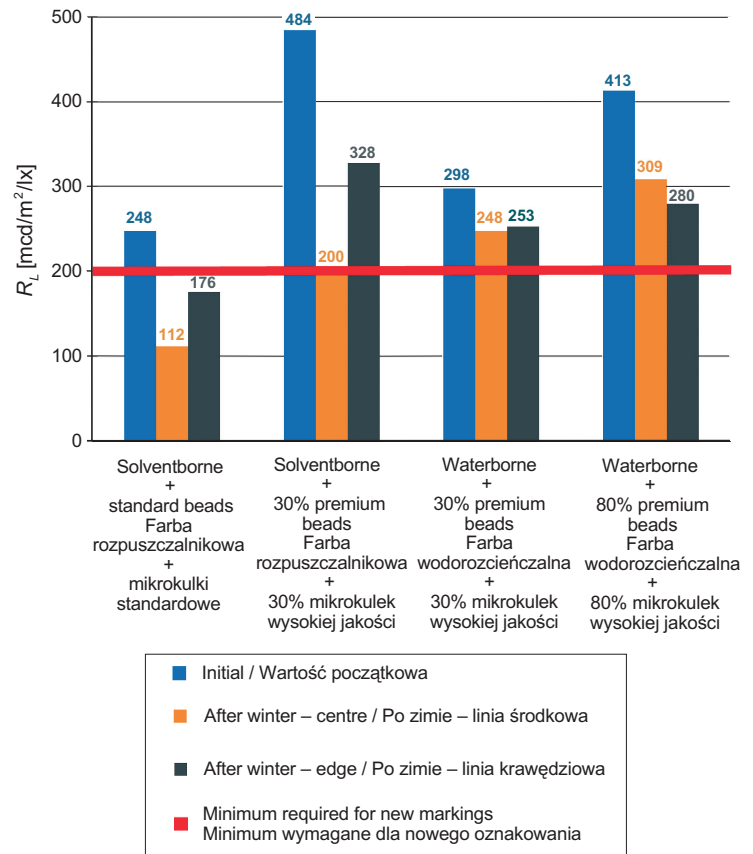


Fig. 1. R_L of the tested road marking systems

Rys. 1. R_L określony dla badanych systemów oznakowania

Makrofotografie wykonane po zimie pokazują, że spadek R_L w przypadku standardowego systemu oznakowań był spowodowany przez wypadanie mikrokulek szklanych (Rys. 2). Farba wodorozcieńczalna wysokiej jakości utrzymała mikrokulki szklane znacznie lepiej (Rys. 3), co potwierdza wcześniejsze doświadczenia autorów z tym materiałem [34].

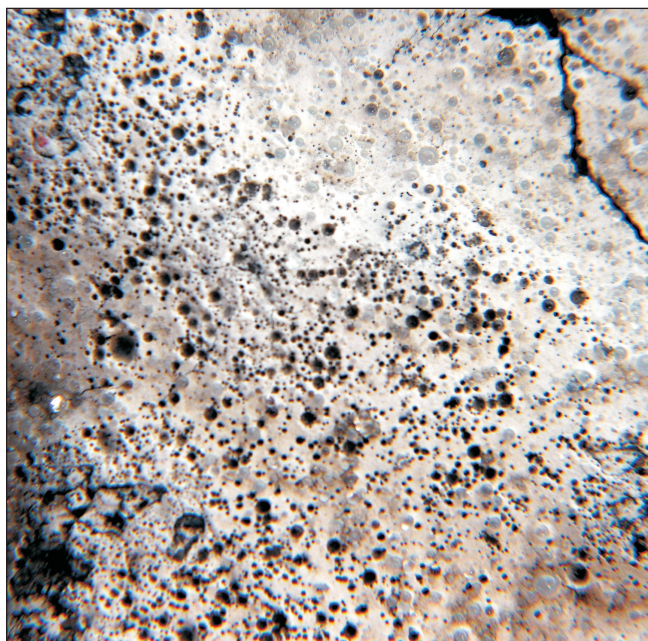


Fig. 2. Standard road marking system after winter; significant loss of glass beads; spot R_L of 103 mcd/m²/lx

Rys. 2. Standardowy system oznakowania po okresie zimowym; istotna utrata mikrokulek szklanych; lokalny $R_L = 103$ mcd/m²/lx

Celowe mogłyby się wydawać próby skorelowania zwiększonej trwałości systemu z różnymi wymiarami mikrokulek szklanych zastosowanych w systemie kontrolnym (100-600 μm) oraz w systemach badanych (212-850 μm) – być może na podstawie wcześniejszych opracowań [19, 20]. Niemniej jednak nie byłoby to miarodajne, ponieważ większe mikrokulki przejmują znacznie większą część oddziaływań pojazdów, a zatem łatwiej jest o ich uszkodzenie lub wypadnięcie niż w przypadku lepiej osłoniętych mniejszych mikrokulek. Co więcej, w samych przywołanych źródłach mikrokulki szklane o większej średnicy były dobierane do powłok o większej grubości [19] lub dodawane do mniejszych mikrokulek właśnie w tym celu, aby zapewnić im dłuższą ochronę i wydłużyć ich okres eksploatacji [20]. W przypadku niniejszego badania z farby rozpuszczalnikowej wypadały również mniejsze mikrokulki szklane (Rys. 2), zaś w farbie wodorozcieńczalnej utrzymały się nawet te większe (Rys. 3). A zatem pożądaną charakterystykę układu można powiązać z doбором farby (takiej, która

Close-up images that were taken after winter demonstrate that the decrease in R_L in the case of standard road marking system was caused by loss of glass beads (Fig. 2). High-performance waterborne road marking paint was capable of holding the glass beads much better (Fig. 3), which confirms the previous experience of the authors with this material [34].

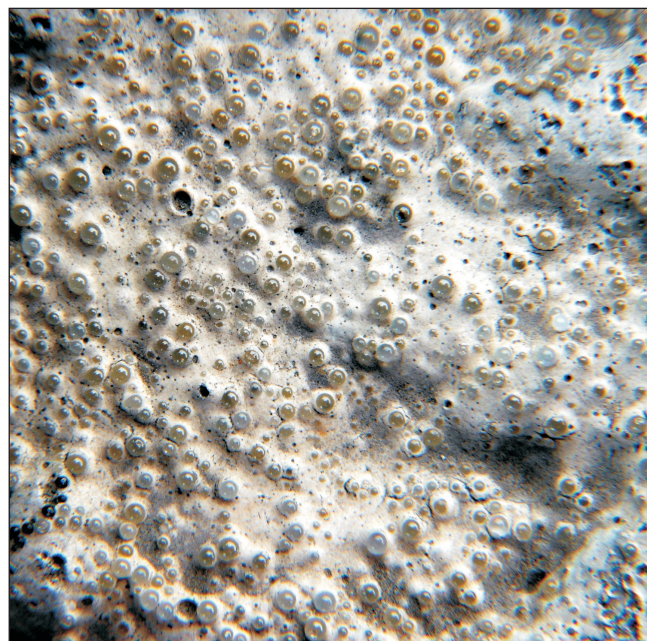


Fig. 3. Premium road marking system after winter; no loss of glass beads; spot R_L of 333 mcd/m²/lx

Rys. 3. System oznakowania z zastosowaniem materiałów wysokiej jakości po okresie zimowym; bez utraty mikrokulek szklanych; lokalny $R_L = 333$ mcd/m²/lx

It may seem worthwhile to correlate the improved performance with different dimensions of glass beads used for the control system (100-600 μm) and those utilised for the experimental systems (212-850 μm), possibly based on previous reports [19, 20]. However, this would not be accurate because it is the larger beads that take the most of the vehicular impact and thus are more easily damaged or removed, while smaller beads are more sheltered. Indeed, in the referenced works, larger size of glass beads was used to match higher film build [19], or a mixture of larger and smaller beads was utilised exactly for the purpose of protecting smaller beads for an extended service life [20]. In the case of this field test, even the smaller glass beads were extracted from the solventborne paint, as shown in Fig. 2, and larger beads remained in waterborne paint, as is clearly visible in Fig. 3. Hence, the performance can be associated with the selection of the road marking paint (to

dłużej utrzyma mikrokulki) oraz z zastosowaniem mikrokulek podwyższonej jakości (które zapewnią wyższe wartości R_L).

Bardzo istotnym aspektem oceny materiałów do znakowania dróg jest wpływ utrzymania zimowego, powodującego fizyczne uszkodzenia mikrokulek szklanych ze względu na przejazdy pługów śnieżnych oraz użycie środków antypoślizgowych. Stwierdzono, że spadek współczynnika R_L w wyniku jednokrotnego odśnieżania nawierzchni wynosi w Europie 6,0-6,2 mcd/m²/lx [35], zaś w Ameryce Północnej 3,2 mcd/m²/lx [36]. Zarządca drogi poinformował, że w okresie badawczym doszło do 17 przejazdów pługów śnieżnych na odcinku oznakowanym farbą rozpuszczalnikową oraz do 22 przejazdów pługów na odcinku oznakowanym farbą wodorocieńczalną wysokiej jakości. Należy zaznaczyć, że ta sama farba wodorocieńczalna zastosowana jako niezależne oznakowanie cienkowarstwowe (nie zaś jako odnowa oznakowania grubowarstwowego strukturalnego) na innym odcinku badawczym osiągnęła wynik negatywny ze względu na fizyczne zniszczenie mikrokulek szklanych przez liczne przejazdy pługów śnieżnych [34]; niemniej jednak, w tamtym badaniu względne różnice w wynikach farb wodorocieńczalnych i rozpuszczalnikowych oraz mikrokulek szklanych były zgodne z wynikami niniejszego badania.

4. OCENA FINANSOWA I ŚRODOWISKOWA

Wyniki uzyskane z zastosowaniem mikrokulek szklanych podwyższonej jakości wskazują jednoznacznie, że udało się osiągnąć system oznakowania charakteryzujący się dwuletnim cyklem odnowy. Uzasadnione jest zatem szacowanie potencjalnych oszczędności poprzez porównanie scenariuszy rocznych oraz dwuletnich cykli odnowy w spodziewanym pozostałym okresie eksploatacji nawierzchni, tj. 16 lat (na wskazanej przez zarządcę drodze o stosunkowo niskim natężeniu ruchu nawierzchnia asfaltowa powinna osiągnąć okres eksploatacji 20 lat; czteroletni okres od pierwszego malowania do odnowy oznakowania został odjęty). Konieczne byłoby zatem 16 odnów oznakowania przy systemie standardowym i tylko 6-8 odnów oznakowania przy systemie o podwyższonej jakości (można się spodziewać, że w najkorzystniejszym przypadku, przy łagodnych zimach, osiągalna byłaby trzyletnia trwałość badanego systemu z wodorocieńczalną farbą wysokiej jakości i mieszanką mikrokulek szklanych zawierającą 80% mikrokulek wysokiej jakości). Kalkulacje zużycia materiałów i szacunki finansowe przedstawione są w Tabl. 3; określono je w przeliczeniu na 1 m² powierzchni oznakowania, zakładając stosowanie ilości materiałów podanych w Tabl. 1. Chociaż malowanie oznakowań przy zastosowaniu obu systemów prowadzone

hold the glass beads) and with the use of premium bead type (to provide high R_L).

A very important consideration in evaluation of road marking materials is the effect of winter maintenance, which causes physical damage of glass beads through the use of abrasive media and snow ploughing. It was reported that R_L loss per snow removal operation in Europe was 6.0-6.2 mcd/m²/lx [35], while a value of 3.2 mcd/m²/lx was reported in North America [36]. The road administrator stated that during the test period there were 17 passes of snow ploughs at the section where the solventborne paint was applied and 22 passes at the road section marked with high-performance waterborne paint. It should be noted that the same waterborne paint applied as thin-layer markings (not as a renewal of thick-layer structure) failed at another test site due to glass beads being physically destroyed by the large number of snow plough passes [34]; nonetheless, the same relative performance of waterborne and solventborne paints and glass beads was observed there.

4. FINANCIAL AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT

The results obtained with premium glass beads clearly show that a two-year road marking system was achieved. Therefore, it is justified to estimate the possible material savings using annual and biennial renewal scenarios for the anticipated remaining lifespan of the road pavement, i.e. 16 years (for the assigned road with relatively low traffic load, asphalt pavement should last 20 years; the four-year period after the initial marking application was subtracted). Thus, 16 renewals with the standard system and only 6-8 renewals with the premium road marking system would be required (it is expected that in the best case, with mild winters, three-year durability could also be achieved with the tested high-performance waterborne paint reflectorised with 80% premium glass beads). Calculations of material usage and financial evaluation are provided in Table 3; they are given per 1 m² of marked surface, assuming that the materials were applied at quantities given in Table 1. Even though application of standard and premium road marking systems is performed with the same equipment and at the same speed, the authors assumed that the labour cost associated with the premium materials would be increased, to account for the required higher quality of work and associated training, as well as to include appropriate profits for the road marking contractor, which are seen as an incentive to select more sustainable solutions. Given that durability of the initial

jest tym samym sprzętem i z identyczną prędkością, autorzy założyli większe koszty pracy związane z użyciem materiałów wyższej jakości, aby uwzględnić wymaganą podwyższoną jakość pracy, związane z tym szkolenia, jak również adekwatny zysk wykonawcy, mający stanowić zachętę do stosowania rozwiązań korzystnych dla środowiska. Biorąc pod uwagę, że trwałość pierwotnie nałożonego oznakowania strukturalnego może się różnić w zależności od jakości materiałów [32, 37], charakteru i natężenia ruchu, utrzymania zimowego oraz licznych czynników środowiskowych, obliczenia dla innych scenariuszy wymagałyby odpowiednich poprawek; niemniej jednak, względne prawidłowości powinny pozostać niezmiennie.

structured application may vary depending on the quality of the materials used [32, 37], local traffic load and type, winter maintenance, and numerous environmental factors, calculations would need to be adjusted accordingly for different scenarios; nonetheless, their relative impacts should remain unchanged.

Table 3. Financial and environmental calculations
Tablica 3. Obliczenia finansowe i środowiskowe

Paint / Farba	Solventborne / Rozpuszczalnikowa		Waterborne / Wodorozcieńczalna	
Glass beads / Mikrokulki szklane	Standard Standardowe	30% premium materiału wysokiej jakości	30% premium materiału wysokiej jakości	80% premium materiału wysokiej jakości
Material price estimate [EUR/m ²] Szacunkowy koszt materiałów	1.09	1.82	2.26	3.46
Labour price estimate [EUR/m ²] Szacunkowy koszt robocizny	0.50	0.55	0.55	0.55
Service life between renewals [years] Okres eksploatacji między odnowami [lata]	1	2	2	3
Material and labour cost per 16 years [EUR/m ²] Koszt materiałów i robocizny przez 16 lat	25.47	18.96	22.44	24.08
Paint consumption per 16 years [kg/m ²] Zużycie farby przez 16 lat	8.0	4.0	4.0	3.0
Glass beads consumption per 16 years [kg/m ²] Zużycie mikrokulek szklanych przez 16 lat	6.4	3.2	3.2	2.4
VOC emissions [kg/m ² /16 years] Emisja VOC [kg/m ² /16 lat]	1.92	0.96	0.10	0.08
OPF [kg O ₃ /m ² /16 years] OPF [kg O ₃ /m ² /16 lat]	3.27	1.63	0.08	0.06

Korzyści finansowe i środowiskowe są ewidentne, o ile rozpatruje się wyniki uzyskane w perspektywie długookresowej – co jest zgodne z wcześniej publikowanymi obliczeniami [25, 32, 37]. Początkowy wyższy koszt materiałów o podwyższonej jakości zostaje w pełni zrekomensowany dzięki wydłużonemu okresowi eksploatacji między odnowami. Pomimo kosztów pracy wyższych o 10%, zrealizować można oszczędności rzędu 5-26%, nawet bez uwzględnienia zmienności cen. Z perspektywy wykonawców powinna to być znacząca korzyść, o ile kontrakty na malowanie oznakowania będą przyznawane na okresy wieloletnie.

Jako że zrównoważony rozwój należy obecnie do najistotniejszych zagadnień [38], wpływ oddziaływania na środowisko stanowi kluczowe kryterium podczas wdrażania nowych technologii. W przedstawionym przypadku zużycie materiałów

Both financial and environmental advantages are obvious, as long as one assesses the outcome from a long-term perspective, which matches previous calculations [25, 32, 37]. Due to the increased service life, the initial high material cost of premium products is fully offset. Despite 10% more expensive labour, the financial savings of 5-26% could be realised, even without considering price volatility. This should be a meaningful advantage for application contractors as long as they are awarded long-term contracts.

Because sustainable development belongs to the key current issues [38], environmental footprint has to be considered as critical in introduction of novel technologies. In the presented case, the material consumption would decrease by 50% due to doubling the service life. In addition,

spadłoby o 50% za sprawą podwojenia okresu eksploatacji między kolejnymi odnowami. Ponadto emisja lotnych związków organicznych *VOC* została by zredukowana o 50-96%, zaś wynikowy potencjał tworzenia ozonu *OFP* spadłby o 50-99%.

Inne potencjalne korzyści płynące z zastosowania mikrokulek szklanych podwyższonej jakości związane są z zapewnianym przez nie współczynnika R_L , którego wzrost skorelowano z obniżeniem liczby wypadków [39], chociaż należy zaznaczyć, że badania poświęcone bardzo wysokim wartościom R_L nie zostały dotychczas przeprowadzone. Ponadto mikrokulki szklane o wysokiej jakości mogą zapewnić wyższą odbłaskowość w warunkach mokrych [22, 37] którą jednoznacznie, skorelowano z poprawą komfortu jazdy [40, 41]. Społeczny odbiór takiego oznakowania również jest pozytywny, kierowcy bowiem wiążą wysoką odbłaskowość z poprawą bezpieczeństwa ruchu drogowego [42, 43]. Co ciekawe, stwierdzono korelację między jakością oznakowania poziomego a przestrzeganiem zasady ruchu drogowego [44]. Ponadto R_L jest konsekwentnie wymieniany jako czynnik mający wpływ na poprawę rozpoznawania pasa ruchu przez systemy wsparcia kierowcy oraz jako niezbędny do właściwego ustalenia pasa ruchu przez rozwijającą się technologię pojazdów autonomicznych [25, 45, 46]. Niewątpliwie potrzebne są dalsze – zakrojone na szeroką skalę – badania poświęcone wysokim wartościom R_L (ponad $300 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$), ze względu na potencjalne korzyści oraz pojawienie się na rynku materiałów mogących zapewnić tak wysoką odbłaskowość.

5. WNIOSKI

Badania terenowe wykazały, że wybór mikrokulek szklanych wysokiej jakości oraz farby wodorozcieńczalnej wysokiej jakości do odnowy strukturalnych oznakowań poziomych prowadził do osiągnięcia dwuletniej trwałości, podczas gdy standardowy system wystarczył zaledwie na jeden rok. Podwojenie okresu między odnowami przekłada się bezpośrednio na oszczędność materiałów, niższą emisję szkodliwych związków chemicznych oraz osiągnięcie bardziej ekologicznego systemu oznakowania drogowego. Co bardzo korzystne dla zarządców dróg i wykonawców oznakowania, znacznie wyższe koszty materiałów o podwyższonej jakości są w pełni rekompensowane dzięki wydłużeniu okresów eksploatacji między odnowami. Co istotne, z perspektywy zespołu malującego oznakowanie, nie wystąpiły żadne problemy praktyczne z nałożeniem farby wodorozcieńczalnej przy zastosowaniu standardowej malowarki, a farba wysychała szybko.

the emissions of *VOC* could be reduced by 50-96% and the associated *OFP* would decrease by 50-99%.

Other possible advantages arising from the use of premium glass beads are associated with higher R_L that they intrinsically provide. Increased R_L has been correlated with lesser number of accidents [39], but a study on very high R_L has never been performed. In addition, the premium glass beads are capable of providing better retroreflectivity under wet conditions [22, 37], which has been clearly correlated with improved driving comfort [40, 41]. Public perception of such markings is also positive, with drivers expecting high R_L to increase road safety [42, 43]. Interestingly, a correlation has been found between the quality of road markings and obedience to the rules of the road [44]. Furthermore, R_L is consistently noted as a factor improving lane recognition by driver assistance systems and is needed for correct lane assignment by the emerging technology of automated vehicles [25, 45, 46]. Further extensive research in the area of high R_L , above $300 \text{ mcd/m}^2/\text{lx}$, is definitely needed because of the possible benefits and the recent commercial availability of materials capable of delivering such performance.

5. CONCLUSIONS

It was demonstrated in the field test that selection of premium glass beads and high-performance waterborne paint to renew structured road markings that had lost their properties led to achieving at least two-year durability, whereas standard road marking system survived only one year. Doubling the durability directly translates into material savings, lower emissions, and thus amore sustainable road marking solution. Very advantageously for road administrators and application contractors involved, much higher costs of the premium materials are fully offset by the prolonged service life. Importantly, from practical perspective of a road marking crew, there were no issues with application of the waterborne paint using standard equipment and the paint dried quickly.

Limitations of the reported study included performing the tests only at one location, at a road with relatively low traffic load. Verification experiments and optimisation of the applied quantities and relative quantity of the premium glass beads are planned. In addition, a comparative study of other thin-layer road marking materials should be performed to validate the obtained results. Study of drop-on anti-skid materials should also be performed, since it has been shown that their presence and type can affect the overall performance [47].

Do ograniczeń opisanego badania zaliczyć należy fakt, iż testy wykonano tylko w jednym miejscu, na drodze o stosunkowo niskim natężeniu ruchu. Zaplanowano doświadczalną weryfikację wyników oraz optymalizację stosowanych ilości materiałów, w tym udziału mikrokulek szklanych podwyższonej jakości. Ponadto, w celu potwierdzenia uzyskanych wyników, powinny zostać wykonane badania porównawcze obejmujące inne materiały cienkowarstwowe. Należy również przeprowadzić badania uwzględniające posypywanie oznakowania materiałami uszorstniającymi, dowiedziono bowiem, że ich obecność i rodzaj wpływają na ogólną charakterystykę używanego oznakowania [47].

INFORMACJE DODATKOWE

Tomasz E. Burghardt jest pracownikiem firmy produkującej materiały do oznakowań drogowych. Wsparcie komercyjne dla niniejszego badania było ograniczone do szkolenia zespołu malującego i nadzoru nad wykonanymi robotami. Przedstawione tu wnioski są własnymi wnioskami autora i nie muszą pokrywać się ze stanowiskiem jego pracodawcy. Zaprezentowane wyniki nie mają stanowić rekomendacji jakiegokolwiek systemu oznakowań drogowych jakiegokolwiek producenta, lecz demonstrację możliwości technologicznych. Pozostali współautorzy deklarują brak konfliktu interesów.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [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] *Calvi A.*: A study on driving performance along horizontal curves of rural roads. *Journal of Transportation Safety and Security*, **7**, 3, 2015, 243-267, DOI: 10.1080/19439962.2014.952468
- [3] *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
- [4] *Pocock B.W., Rhodes C.C.*: Principles of glass-bead reflectorization. *Highway Research Board Bulletin*, **57**, 1952, 32-48
- [5] *Vedam K., Stoult 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
- [6] Marking a road toward a safer future. An ERF Position Paper on how road markings can make our road safer; <https://erf.be/publications/markings-the-way-towards-a-safer-future> (accessed 21 February 2019). European Union Road Federation, Brussels, 2015
- [7] *Gibbons R.B., Williams B., Cottrell B.*: The Refinement of Drivers' Visibility Needs During Wet Night Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2272**, 2012, 113-120, DOI: 10.3141/2272-13
- [7] *Gibbons R.B., Williams B., Cottrell B.*: The Refinement of Drivers' Visibility Needs During Wet Night Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2272**, 2012, 113-120, DOI: 10.3141/2272-13
- [8] 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). Kancelaria Rady Ministrów, Warszawa, 2003
- [9] Wypadki drogowe w Polsce w 2019 roku. Komenda Główna Policji, Biuro Ruchu Drogowego, Warszawa, 2020
- [10] *Kornalewski L., Kowalska-Sudyka M., Ledwolorz A.*: Proposal of post evaluation methodology for the impact of a new road investment project on road safety. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **19**, 3, 2020, 183-197, DOI: 10.7409/rabdim.020.012
- [11] *Craig W.N., Sitzabee W.E., Rasdorf W.J., Hummer J.E.*: Statistical validation of the effect of lateral line location on pavement marking retroreflectivity degradation. *Public Works Management and Policy*, **12**, 2, 2007, 431-450, DOI: 10.1177/1087724X07308773
- [12] *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/ijt.2015.5(2).06

ACKNOWLEDGEMENT

Tomasz E. Burghardt is an employee of a manufacturer of road marking materials. Commercial support for this trial was limited to training of the applying crew and supervision of the performed work. The conclusions given herein are of his own and not necessarily that of his employer. The presented results are not to serve as recommendation of any road marking system from any manufacturer, but are a demonstration of technological capabilities. Other co-authors declare no conflicts of interest.

- [13] *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
- [14] *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
- [15] *Migletz J., Graham J., Harwood D., Bauer K.*: Service life of durable pavement markings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1749**, 2001, 13-21, DOI: 10.3141/1749-03
- [16] *Babić D., Šćukanec A., Babić D., Fiočić M.*: Model for Predicting Road Markings Service Life. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, **14**, 3, 2019, 341-359, DOI: 10.7250/bjrbe.2019-14.447
- [17] *Higgins L., Miles J., Carlson P., Burns D., Aktan F., Zender M., Kaczmarczik J.*: Night time visibility of prototype work zone markings under dry, wet-recovery, and rain conditions. *Transportation Research Record*, **2107**, 2009, 69-75, DOI: 10.3141/2107-07
- [18] *Burns D., Hedblom T., Miller T.*: Modern Pavement Marking Systems: Relationship Between Optics and Nighttime Visibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2056**, 2007, 43-51, DOI: 10.3141/2056-06
- [19] *Kalchbrenner J.*: Large glass beads for pavement markings. *Transportation Research Record*, **1230**, 1989, 28-36
- [20] *Greyson E.*: Low-Cost, Long-Term Wet Retroreflectivity from Waterborne Traffic Paint: Wet Retroreflectivity Performance with Various Glass Bead Packages. *Proceedings of Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, 10-14 January 2016, Washington, DC, United States, paper 16-1718
- [21] *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*, 24-25 November 2016, Belgrade, Serbia, 1092-1096
- [22] *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*, 1-2 June 2017, Opatija, Croatia, 51-58
- [23] *Burghardt T.E.*: High durability - high retroreflectivity solution for a structured road marking system. *Proceedings of International Conference on Traffic and Transport Engineering*, 27-28 September 2018, Belgrade, Serbia, 1096-1102
- [24] *Burghardt T.E., Pashkevich A., Fiočić M.*: Podwyższona trwałość i wysoka odbłaskowość poziomego oznakowania dróg: doświadczenia w Szwajcarii i Chorwacji. *Drogownictwo*, **73**, 6, 2018, 196-200
- [25] *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
- [26] *Austrian Standard ONR 22440-1: Road markings – Durability – Part 1: General [in German: ONR 22440-1: Bodenmarkierungen. Funktionsdauer – Teil 1: Allgemeines]. Austrian Standards Institute, Vienna, 2010*
- [27] *European Standard EN 1423:2012. Road marking materials. Drop on materials. Glass beads, antiskid aggregates and mixtures of the two. European Committee for Standardization, Brussels, 2012*
- [28] *European Standard EN 1436:2009. Road marking materials. Road marking performance for road users and test methods. European Committee for Standardization, Brussels, 2009*
- [29] *Directive 2004/42/CE of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in certain paints and varnishes and vehicle refinishing products and amending Directive 1999/13/EC. Official Journal of the European Union, L 143/42, 2004, 87-96, <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/42/oj>*
- [30] *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
- [31] *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
- [32] *Burghardt T.E., Pashkevich A.*: Materials selection for structured horizontal road markings: financial and environmental case studies. *European Transport Research Review*, **12**, 2020, 11, DOI: 10.1186/s12544-020-0397-x
- [33] *Jaffe A.B., Newell R.G., Stavins R.N.*: Environmental policy and technological change. *Environmental and Resource Economics*, **22**, 1, 2002, 41-70, DOI: 10.1023/A:1015519401088
- [34] *Burghardt T.E., Pashkevich A., Fiočić M., Żakowska L.*: Horizontal Road Markings with High Retroreflectivity: Durability, Environmental, and Financial Considerations. *Advances in Transportation Studies: An International Journal*, **47**, 2019, 49-60
- [35] *Mitrović A., Šćukanec A., Babić D.*: Impact of Winter Maintenance on Retroreflection of Road Markings. *Proceedings of International Scientific Conference ZIRP2016*, 12 April 2016, Zagreb, Croatia, 119-127
- [36] *Mull D.M., Sitzabee W.E.*: Paint pavement marking performance prediction model. *Journal of Transportation Engineering*, **138**, 5, 2011, 618-624, DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000360
- [37] *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
- [38] *von Weizsäcker E.U., Wijkman A.*: *Come on! Capitalism, Short-termism, Population and the Destruction of the Planet.* Springer-Verlag, New York, 2017, DOI: 10.1007/978-1-4939-7419-1

- [39] *Avelar R.E., Carlson P.J.*: Link between pavement marking retroreflectivity and night crashes on Michigan two-lane highways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2404**, 2014, 59-67, DOI: 10.3141/2404-07
- [40] *Horberry T., Anderson J., Regan M.A.*: The possible safety benefits of enhanced road markings: a driving simulator evaluation. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **9**, 1, 2006, 77-87, DOI: 10.1016/j.trf.2005.09.002
- [41] *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
- [42] *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*, 1-2 June 2017, Opatija, Croatia, 277-287
- [43] *Burghardt T.E., Pashkevich A., Piegza A.*: Percepcja przez kierowców poziomego oznakowania dróg o wysokiej odbliśkowości. *Transport Miejski i Regionalny*, **8**, 2017, 5-10
- [44] *Diependaele K.*: Non-compliance with pedestrian traffic lights in Belgian cities. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, **67**, 2018, 230-241, DOI: 10.1016/j.trf.2016.11.017
- [45] *Matowicki M., Příbyl O., Příbyl P.*: Analysis of possibility to utilize road marking for the needs of autonomous vehicles. In *Smart Cities Symposium Prague*, 26-27 May 2016, Prague, Czech Republic, DOI: 10.1109/SCSP.2016.7501026
- [46] *Mosböck H., Burghardt T.E.*: Horizontal Road Markings and Autonomous Driving - Back from the Future. *Proceedings of 37th Annual Southern African Transport Conference*, 9-12 July 2018, Pretoria, South Africa, 557-568; <http://hdl.handle.net/2263/69562>
- [47] *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