

Wpływ drogowych nawierzchni betonowych na bezpieczeństwo i zużycie energii w tunelach

The influence of concrete roads on safety and energy saving in tunnels

Słowa kluczowe: drogi betonowe, nawierzchnie, bezpieczeństwo w tunelach, oszczędzanie energii, jasność

Keywords: concrete roads, pavement, tunnel safety, energy-saving, illumination, brightness

1. Wprowadzenie, opis problemu i cele

Tunele i przejścia podziemne stanowią niezwykle ważny element infrastruktury ruchu drogowego, zwłaszcza na obszarach górskich. Jednak prócz korzyści, do których należy skrócenie czasu transportu i odległości, tunele stanowią również duże wyzwanie technologiczne w zakresie bezpieczeństwa dla kierowców. Za bezpieczeństwo odpowiadają przede wszystkim operatorzy tuneli. Odpowiednia iluminacja obszaru ruchu jest najbardziej efektywnym wkładem w odniesieniu do bezpieczeństwa poruszającej się jednostki, jak również w odniesieniu do kosztów eksploatacji tunelu. Jasność, a także rozkład światła w tunelach zależy nie tylko od rodzaju lub sposobu działania oświetlenia, ale w dużej mierze, także od optycznych właściwości nawierzchni dróg i ścian tuneli, takich jak ich jasność, współczynnik odbicia i stopień zanieczyszczenia. Odpowiedni dobór materiału konstrukcyjnego pod względem jego luminancji powierzchniowej oraz współczynnika odbicia światła jest zatem najważniejszy. Dlatego celem projektu badawczego było zbadanie wpływu różnych materiałów na drogi (asfalt, powierzchnia betonu jak również poziom jej jasności) i ściany tuneli (wyłożenie tuneli o różnym stopniu zabrudzenia, szary i biały torkret), na jakość oświetlenia oraz zużycie energii w konstrukcjach tunelowych. Aby uzyskane wyniki były porównywalne, badanie przeprowadzono w stałych warunkach, w istniejącym tunelu doświadczalnym. W ten sposób możliwe było wykluczenie niektórych parametrów tunelu, takich jak jego geometria i układ oświetlenia. Dodatkowo efekty wyboru idealnej powierzchni można również ocenić wizualnie. W ten sposób powinny odbywać się szkolenia przyszłych planistów konstrukcji tunelowych, na których będą mieli możliwość sprawdzenia konkretnych warunków oświetlenia tuneli i przejść podziemnych, co tym samym przyczyni się do polepszenia subiektywnego poczucia bezpieczeństwa indywidualnych użytkowników dróg.

¹Autor korespondencyjny: office@smartminerals.at

1. Introduction, presentation of problem and goals

Especially in mountain areas, tunnels and underpasses are indispensable for the infrastructure and represent significant structures for the road traffic. Besides the benefits, such as reduction in transport time and distance, tunnels also pose high safety technologic requirements to the road maintainers resp. tunnel operators. An according illumination of the traffic area is the most efficient contribution with regard to the safety of the individual as well as to the running costs of the tunnel. Brightness and light distribution in tunnels are not only influenced by the type resp. the performance of lighting, but to a large extent also by the optical surface properties of the road and the tunnel walls such as i.e. brightness, reflectivity and degree of contamination.

The according choice of construction material with regard to its surface luminosity and its reflectivity is therefore paramount.

That is why the goal of the research project was the investigation of the influence of different materials for roads (tarmac, concrete surface, brightened concrete surface) and tunnel walls (tunnel coating with various degrees of contamination, grey and white shotcrete) on the lighting quality and the energy consumption of tunnel constructions. In order to achieve comparable results, the investigation was conducted under stable conditions in an existing test tunnel. This way tunnel specific parameters, such as i.e. geometry and illumination arrangements, can be ruled out. Additionally the effects of the ideal surface choice are also presented visually. Doing so, planners of future tunnel constructions shall be enabled to create an improved lighting situation in tunnels and underpasses and therefore to contribute to strengthening the subjective sense of security for the individual road user.

¹Corresponding Author: office@smartminerals.at

2. Wdrożenie projektu

Aby przeprowadzić symulację różnych stopni zanieczyszczenia ścian tunelu, odczyt współczynników luminacji przeprowadzono w różnych, również obecnie stosowanych, konstrukcjach tunelowych. W tym celu wybrano trzy zanieczyszczone konstrukcje tunelowe w różnym wieku, a ich charakterystykę fotometryczną określono przed i po oczyszczeniu tunelu. Obserwacje prowadzono w 5 reprezentatywnych lokalizacjach, w każdej wykonano 10 wideo rejestracji. Rysunek 1 pokazuje przykładowe wyznaczanie współczynników luminacji zanieczyszczonej powierzchni tunelu przy użyciu spektrofotometru.

Na podstawie zarejestrowanych kluczowych wartości luminacji starano się odtworzyć powierzchnię tunelu w warunkach laboratoryjnych. W rezultacie można było przeprowadzić symulację różnych stopni zanieczyszczenia powierzchni (bez pokrycia, lekkie zanieczyszczenie, silne zanieczyszczenie oraz powierzchnie oczyszczone) poprzez koloryzację wyłożenia tunelu doświadczalnego. Dodatkowo zastosowano alternatywne warstwy wewnętrzne nakładane metodą torkretowania - szarą i białą.

2.1. Warunki prowadzenia badań i prognozy metrologiczne

Na rysunku 2 pokazano tunel doświadczalny w stanie wyjściowym o średnicy około 6 m i długości około 20 m. Po odpowiedniej ada-



Rys. 1. Rejestracja współczynników luminacji w 5 różnych lokalizacjach przed i po oczyszczeniu tunelu [SMG]

Fig. 1. Recording of lightness coefficients at 5 different locations before and after tunnel cleaning. [Source: SMG]

ptacji tunelu jego wewnętrzna powierzchnia może być pokrywana różnymi powłokami doświadczalnymi.

Na rysunku 3 przedstawiono typowe przykłady powłok tunelowych o różnych stopniach zanieczyszczenia oraz białej mieszanki torkretowej.

Jako nawierzchnię drogi wybrano konwencjonalną nawierzchnię asfaltową, z odsłoniętym kruszywem z jasnego oczyszczonego betonu. Zestawienie różnych nawierzchni, rodzajów farb tunelowych i stopni zanieczyszczenia (czyste/brudne) dało łącznie 36 różnych kombinacji kolorów powierzchni do przeprowadzenia badań.

Szczegółowa ocena warunków odbywała się przy użyciu trzech rodzajów lamp stosowanych przy budowie dróg: lampy metalohalogenkowe (lampy HQI), lampy sodowe (lampy NVA) i diody elektroluminescencyjne (lampy LED). Lampy o różnych wymiarach umieszczano w środku tunelu doświadczalnego tak, aby

2. Project implementation

In order to simulate various degrees of contamination of tunnel walls, the reading of the lightness coefficients were conducted in different and currently active tunnel constructions. For this purpose three contaminated tunnel constructions of different ages were chosen and their photometrical characteristics were determined before and after the tunnel cleaning. The observation took place at 5 representative locations with 10 individual recordings each. Fig. 1. exemplarily shows the determination of lightness coefficients of a contaminated tunnel surface using a spectrophotometer.

Based on the identified luminosity characteristics the mapping of the determined lightness coefficients resp. of the key photometric values of coatings with similar photometric properties took place in a colour laboratory. As a result it was possible to simulate various degrees of contamination (sign-off conditions, lightly contaminated, heavily contaminated, cleaned) by colouring the inner shell of the test tunnel. Additionally alternative inner shell coatings with grey and white spray mortar were used.

2.1. Tests conditions and metrological detection

Fig. 2. shows a test tunnel with a diameter of approx. 6 m and a length of approx. 20 m in its original condition. After the adaptation of the tunnel its inner surface could be coated with different surface systems.



Rys. 2. Oryginalny tunel doświadczalny [VÖZFI]

Fig. 2. Original test tunnel. [Source: VÖZFI]

Tablica 1 / Table 1

KOMBINACJE KOLORÓW POWIERZCHNI

VARIOUS EVALUATION SITUATIONS

Evaluation situation Oceniana kombinacja	Side wall Ściany boczne	Surface condition Stan nawierzchni	Tunnel ridges Strop tunelu
Inner layer evaluation situation 1 Warstwa wewnętrzna, wariant 1	Tunnel coating Powłoka tunelowa	Acceptance condition Stan po odbiorze	Contaminated Zanieczyszczony
Inner layer evaluation situation 2 Warstwa wewnętrzna, wariant 2	Tunnel coating Powłoka tunelowa	Acceptance condition Stan po odbiorze	Cleaned Czysty
Inner layer evaluation situation 3 Warstwa wewnętrzna, wariant 3	Tunnel coating Powłoka tunelowa	Lightly contaminated Lekko zanieczyszczony	Contaminated Zanieczyszczony
Inner layer evaluation situation 4 Warstwa wewnętrzna, wariant 4	Tunnel coating Powłoka tunelowa	Lightly contaminated Lekko zanieczyszczony	Cleaned Czysty
Inner layer evaluation situation 5 Warstwa wewnętrzna, wariant 5	Tunnel coating Powłoka tunelowa	Cleaned Czysty	Contaminated Zanieczyszczony
Inner layer evaluation situation 6 Warstwa wewnętrzna, wariant 6	Tunnel coating Powłoka tunelowa	Cleaned Czysty	Cleaned Czysty
Inner layer evaluation situation 7 Warstwa wewnętrzna, wariant 7	Shotcrete grey Torkret szary	Acceptance condition Stan po odbiorze	Contaminated Zanieczyszczony
Inner layer evaluation situation 8 Warstwa wewnętrzna, wariant 8	Shotcrete grey Torkret szary	Acceptance condition Stan po odbiorze	Cleaned Czysty
Inner layer evaluation situation 9 Warstwa wewnętrzna, wariant 9	Shotcrete white Torkret biały	Acceptance condition Stan po odbiorze	Contaminated Zanieczyszczony
Inner layer evaluation situation 10 Warstwa wewnętrzna, wariant 10	Shotcrete white Torkret biały	Acceptance condition Stan po odbiorze	Cleaned Czysty
Inner layer evaluation situation 11 Warstwa wewnętrzna, wariant 11	Tunnel coating Powłoka tunelowa	Heavily contaminated Bardzo zanieczyszczony	Contaminated Zanieczyszczony
Inner layer evaluation situation 12 Warstwa wewnętrzna, wariant 12	Tunnel coating Powłoka tunelowa	Heavily contaminated Bardzo zanieczyszczony	Cleaned Czysty
Evaluation situation Oceniana sytuacja	Road Rodzaj nawierzchni	Surface condition Stan nawierzchni	Tunnel ridges Strop tunelu
Road evaluation situation 1 Ocena drogi, wariant 1	Asphalt Asfalt	Acceptance condition ¹⁾ Stan po odbiorze	-
Road evaluation situation 2 Ocena drogi, wariant 2	Exposed aggregate Concrete common / Ekspozowane kruszywo zwykłe	Acceptance condition Stan po odbiorze	-
Road evaluation situation 3 Ocena drogi, wariant 3	Exposed aggregate Concrete bright Ekspozowane kruszywo jasne	Acceptance condition / Stan po odbiorze	-

¹⁾Asfalt był piaskowany w celu symulacji warunków nawierzchni po około 1 roku użytkowania (nieznaczne rozjaśnienie poprzez ścieranie warstwy bitumicznej do kruszywa nawierzchni) / Aphalt was sandblasted in order to simulate the surface conditions after aprox. 1 year of exploitation (slight brightening by wearing down the bitumen to aggregate of the road surface).



Rys. 3. Przykłady rodzajów farb tunelowych z różnymi poziomami zanieczyszczenia (po lewej i w środku) oraz z białym torkretem (po prawej) [VÖZFI]
Fig. 3. Examples of tunnel paint systems with different contaminations (on the left and in the middle) as well as with white shotcrete (on the right).
[Source: VÖZFI]

można było je przesuwac w sposob umozliwiajacy zamocowanie w dokladnie tej samej pozycji (wysokosc i polozenie). Aparat do mierzenia luminancji ustawiono w odleglosci 60 m od lampy na wysokosci 1,5 m, w celu pomiaru gescosci strumienia swiatla na powierzchni drogi. Pomiar kalibracyjny przeprowadzano w nocy. Kolejne pomiary przeprowadzano przy zaslonietych wjazdach tunelowych i przy mniejszych odleglosciach od lampy tunelowej, wewnatrz tunelu.

Kolejna wazna implikacja byla ocena luminancji scian. Obecnie niektore europejskie wytyczne uwzgledniaja stosunek „luminancji nawierzchni „ do „luminancji sciany”. Moze sie to przyczynic do ograniczenia poziomu oswietlenia tunelu uwzgledniajac wieksza luminancje scian (1, 2). Austriackie wytyczne nie zawieraja konkretnych sugestii dotyczacych takiej sytuacji (3), ale wyniki badan moga wskazywac na wplyw zastosowanych w tunelu materialow (sciany, strop i nawierzchnia) na koniecznosc oswietlania wnetrza.

Sterowanie roznymi rodzajami lamp odbywalo sie za pomoca szafy sterowniczej, ktora pozwalala na przyciemnianie roznnych lamp w sposob gwarantujacy stala, podobna gescosc swiatla we wzczesniej zdefiniowanym miejscu. Dodatkowo szafa sterownicza mierzyla ilosc energii zuzytej do oswietlenia. Czujnik gescosci swiatla firmy Electric Special oferuje mozliwosc porownania roznnych gescosci swiatla odbitego od mierzonych obiektow – to jest od scian tunelu i nawierzchni oraz ich statystyczna analize. Rysunek 4 pokazuje przyklad rozkladu gescosci swiatla w tunelu w roznnych warunkach nawierzchni oraz scian tunelu.

Dokladna geometria powierzchni umozliwia bezposrednie porownanie wszystkich wynikow, a tym samym postawienia zasadnych tez dotyczacych charakterystyki powierzchni oraz jej wplywu na poziom luminancji.

2.2. Budowa nawierzchni betonowej

Betonowa nawierzchnia drogowa w tunelu dowiadczalnym powinna byc w miare mozliwosci wymienna i przenoшна, aby umozliwic wymiane nawierzchni drogi i ocene roznnych sytuacji. Powierzchnia betonu zostala przygotowana z odslonietym kruszywem w warstwie powierzchniowej, zgodnie z wymaganiami RVS 08.17.02 (4). Oprócz konwencjonalnej nawierzchni betonowej

Fig. 3. depicts the typical examples of tunnel coatings with different contaminations as well as white shotcrete application.

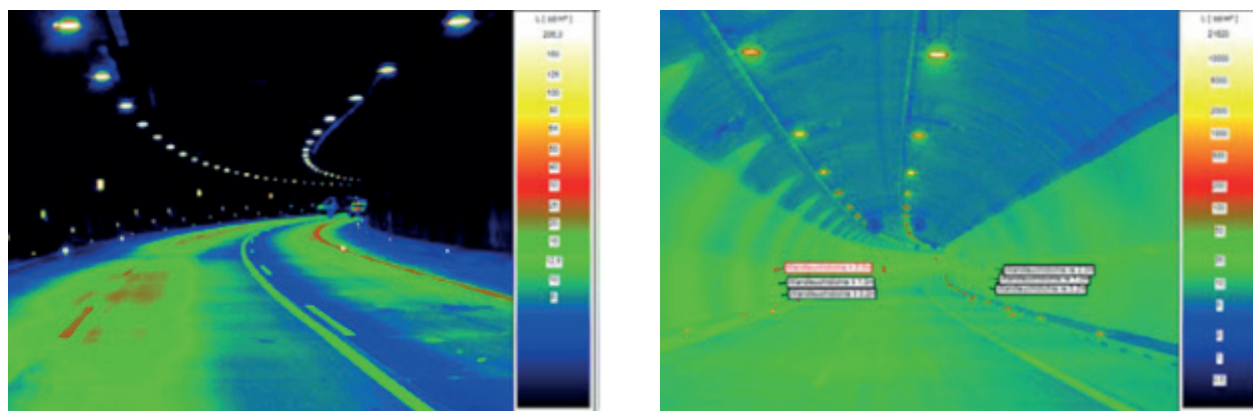
Tarmac, conventional road surface in exposed aggregate concrete and especially bright washed concrete were chosen as road surfaces. The combination of different roads, tunnel paint systems and of contamination degrees (clean/dirty) adds up to 36 different evaluation situations.

The evaluation of the specific conditions took place with three types of lamps, which are used in road building factories: metal halide lamps (HQL-lamps), sodium vapour lamps (NVA- lamps) and light emitting diode lamps (LED-lamps). The lamps, that had different dimensions, were placed in the middle of the test tunnel and could be moved in a manner that allowed a fixation at exactly the same position (height and location). A luminance camera was put up in 60 m distance of the lamp at a height of 1.5 m in order to measure the light density of the road surface. This first calibration measurement took place during night-time. The following measurements then took place in darkened portals, also in a smaller distance of the tunnel lamp in the tunnel itself.

Another important implication was the consideration of the luminance of the wall. Currently some European guidelines consider the ratio of „luminance road“ to „luminance wall“. Doing so can, for example, decrease the illumination level during a higher luminance of the wall (1, 2). The Austrian guidelines do not mention specific suggestions for this situation (3), but the research results could point out the impact of the used tunnel materials (walls, roof and road) on the necessary interior lighting.

The control of the different type of lamps took place using a specially adapted control cabinet that allowed dimming of the various lighting fixtures in a manner that guaranteed a constant similar light density at a previously defined spot. Additionally the control cabinet pointed out the used energy in the dimmed situation.

The light density sensor of the company Electric Special that was used offers the possibility to compare various light densities (i.e. tunnel wall and road) with each other and to statistically analyse them.



Rys. 4. Przykład oswietlenia przy bardzo malym – po lewej i bardzo duzym poziomie luminancji scian – po prawej (Broll Lighting Systems)

Fig. 4. Illumination example with very low (left) and very high luminance values (right) on the wall. (Source: Broll Lighting Systems)

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI ŚWIEŻEGO BETONU NAWIERZCHNIOWEGO

FRESH CONCRETE PARAMETERS OF THE CONSTRUCTED CONCRETE ROAD

Właściwość Property	Exposed aggregate concrete common (MV 101) Ekspozowane kruszywo zwykłe (MV 101)	Exposed aggregate concrete bright (MV 102) Ekspozowane kruszywo jasne (MV 102)
CEM II/B-S 42,5 N, DZ	470 kg/m ³	470 kg/m ³
Air content of the fresh concrete Zawartość powietrza w świeżej mieszance	12,0 %	8,0 %
Fresh concrete-water ratio / Stosunek w/c	0,39	0,39
Aggregate RK 0/1 / Kruszywo RK 0/1	500 kg/m ³	500 kg/m ³
Aggregate KK 4/8 / Kruszywo KK 4/8	1200 kg/m ³	1200 kg/m ³
Additive 1: Plasticizer / Domieszka 1: Plastyfikator	4,0 kg/m ³	2,1 kg/m ³
Additive 2: Air entrainment / Domieszka 2: Napowietrzająca	4,2 kg/m ³	4,2 kg/m ³
Texture consistency (flow table test) / Rozpływ	58 cm	48 cm
Bulk density of the fresh concrete / Gęstość	2119 kg/m ³	2257 kg/m ³
Addition of Titanium Oxide Yes/ No / Dodatek bieli tytanowej Tak / Nie	No / Nie	Yes – 3 % of cement mass = 14.1 kg/ m ³ / Tak - 3 % masy cementu = 14,1 kg/m ³

Tablica 3 / Table 3

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZŁUPYWANIE PO 2 I 28 DNIACH DLA MIESZANKI Z EKSPONOWANYM KRUSZYWEM ZWYKŁYM (MV 101) I Z EKSPONOWANYM KRUSZYWEM JASNYM (MV 102)

SPLITTING TENSILE STRENGTH AFTER 2 AND 28 DAYS FOR THE EXPOSED AGGREGATE CONCRETE COMMON (MV 101) AND EXPOSED AGGREGATE CONCRETE BRIGHT (MV 102)

Właściwość Property	Concrete age, days Czas dojrzewania, dni	Splitting tensile strength, N/mm ² Wytrzymałość na rozłupywanie, N/mm ²	
		single values poszczególne wartości	mean value wartość średnia
exposed aggregate concrete common (MV 101) / ekspozowane kruszywo zwykłe	2	2,35; 2,30; 2,40	2,4
	28	4,30; 4,40; 4,30	4,3
exposed aggregate concrete bright (MV 102) / ekspozowane kruszywo jasne	2	2,75; 3,05; 3,20	3,0
	28	5,75; 5,70; 5,40	5,6

[MV101 – z ekspozowanym kruszywem zwykłym] zbudowano nawierzchnię rozjaśnioną pigmentem z bieli tytanowej – MMV102 – z ekspozowanym kruszywem jasnym. Nawierzchnia o grubości 8 cm została położona na pomocniczych płytach XPS o grubości 2 cm. Powierzchnia wybudowanej nawierzchni wynosiła ok. 45 m². Następnie stwardniały zaczyn cementowy szcztokowano, a betonową nawierzchnię pocięto na 72 płyty o wymiarach 80 x 130 cm, które pojedynczo przechowywano na paletach [80 x 130 cm – rysunek 5].

Receptury mieszanek MV101 i MV102 i wyniki badań świeżego betonu według ONR 23303: 2010 (5) przedstawiono w tablicy 2. Charakterystykę betonu przedstawiono w tablicach 3 i 4.

2.3. Adaptacja tunelu doświadczalnego

W celu przeprowadzenia testów w stabilnych warunkach przystosowano istniejący już tunel doświadczalny należący do firmy Junger [rysunki 6a-6f]. Nawierzchnia w tym tunelu była asfaltowana; por-

As an example, Fig. 4. illustrates the light density distribution of tunnel constructions with different surface conditions of the tunnel walls.

The exact same surface geometry allows the direct comparison of all results and hence well-founded statements about the surface characteristics and their impact.

2.2. Construction of the concrete road surface

The concrete road surface for the test tunnel should be exchangeable and portable, in order to have the possibility to change the road-surface during the test of different evaluation situations. The concrete surface was constructed as top-layer exposed aggregate concrete according to requirements of RVS 08.17.02 (4). Additionally to the conventional concrete road (MV101 - Exposed Aggregate Concrete common) a concrete road with brightening titanium oxide colour pigments was built (MV102 - Exposed Aggregate Concrete bright). The road was made in an auxiliary formwork



Rys. 5. Budowa nawierzchni betonowej do tunelu doświadczalnego

- a: Przygotowane deskowanie pomocnicze 3,2 x 23,4 m,
- b: Wylewanie betonu z eksponowanym kruszywem zwykłym [MV101 – warstwa wierzchnia: beton F52 GK8 CEMII / B-S 42,5N (DZ) bez bieli tytanowej],
- c: Wylewanie betonu z eksponowanym kruszywem jasnym – MV102, warstwa wierzchnia: beton F52 GK8 CEMII / B-S 42,5N (DZ) z tlenkiem tytanu, aplikacja środka wykończeniowego,
- d: Cięcie poszczególnych płyt betonowych do rozmiarów palety [1,2 x 0,8 m],
- e: Składowanie płyt,
- f: Wykończona powierzchnia betonu z kruszywem eksponowanym: (SMG).

Fig. 5. Construction of concrete surface for the test tunnel

- a: Prepared auxiliary formwork 3.2 x 23.4 m,
- b: Concrete pouring of common exposed aggregate concrete (MV101 – top-layer concrete F52 GK8 CEMII / B-S 42.5N (DZ) without titanium oxide),
- c: Concrete pouring of light exposed aggregate concrete (MV102 top-layer concrete F52 GK8 CEMII / B-S 42.5N (DZ) with titanium oxide) and application of after-treatment agent,
- d: Cutting of the individual concrete panels to pallet size (1.2 x 0.8 m),
- e: Storage of panels,
- f: Finished exposed aggregate concrete surface [Source: SMG].

Tablica 4 / Table 4

ZAWARTOŚĆ POWIETRZA W MIESZANKACH Z EKSPONOWANYM KRUSZYWEM ZWYKŁYM (MV 101) I Z EKSPONOWANYM KRUSZYWEM JASNYM (MV 102)

AIR CONTENT AND AIR VOID CHARACTERISTICS FOR THE EXPOSED AGGREGATE CONCRETE COMMON (MV 101) AND EXPOSED AGGREGATE CONCRETE BRIGHT (MV 102)

Material Material	Air content of the fresh concrete, % Zawartość powietrza, %	Air void characteristics L300 ^{a)} , % Zawartość porów do 300 µm, %
exposed aggregate concrete common (MV 101) eksponowane kruszywo zwykłe	14,87	7,0
exposed aggregate concrete bright (MV 102) eksponowane kruszywo jasne	7,81	4,9

^{a)}Micro air content < 300 µm

tale tunelowe zostały zaciemnione materiałami nie przepuszczającymi światła, głównie za pomocą deskowania oraz czarnych mat.

Pomiary prowadzono na jednej z dwóch rodzajów nawierzchni betonowych lub na powierzchni asfaltowej, w zależności od oceniającego wariantu. Oświetlenie dostarczone przez firmę Broll zostało wyposażone w niezbędne sterowanie i zainstalowane w tunelu. Firma Electric Special zainstalowała dwa czujniki luminancji, aby określić jej poziom na wewnętrznej ścianie tunelu, jak również na nawierzchni drogi. W czasie pomiarów próbnych system sterowania oświetleniem został zbadany przy użyciu trzech typów lamp [LED, NAV, HQI]. Ustawienie lamp zaprojektowano tak, aby luminancja wynosiła 10 cd/m² na nawierzchni ze wszystkimi trzema rodzajami lamp. Rysunek 7 przedstawia proces przygotowania do pomiarów przy różnych kombinacjach kolorów stropu, ścian tunelu i nawierzchni drogi.

2.4. Pomiary

Po wykonaniu pomiarów analizowano wyniki pomiarów wykonanych dla różnych wariantów [tablica 1]. Pierwszym zadaniem było zaadaptowanie powierzchni ścian tunelu poprzez pokrycie ich kolorami odpowiadającymi różnym materiałom. Następnie, w każdym przypadku, nawierzchnia drogi ewentualnie strop tunelu został dostosowany do konkretnego badanego wariantu. Rysunek 8 pokazuje postęp prac. Po zaadaptowaniu wnętrza tunelu według wariantów z tabeli 1, montowano jeden z trzech analizowanych typów oświetlenia tunelowego.

Pomiary dokonywano w szczelnie zaciemnionym tunelu. Wszystkie lampy podlegały regulacji tak, aby uzyskać luminancję 10 cd/m² na powierzchni drogi. Pomiar luminancji wewnętrznej warstwy ścian tunelu prowadzono równocześnie z pomiarem nawierzchni. Pomiary prowadzono po upewnieniu się, że zagwarantowano stałe warunki pracy na czas pomiaru. Po zakończeniu pomiarów za każdym razem wymieniano lampy. Oprócz dokumentacji meteorologicznej prowadzono również dokumentację zdjęciową. Dla lepszego porównywania obserwacji optycznych używano atrapy samochodu, która zawsze była ustawiona w tym samym miejscu. Odległości atrapy samochodu oraz oświetlenia zostały dostosowane do pomniejszych rozmiarów tunelu doświadczalnego. Aby zagwarantować powtarzalność pomiarów zastosowano

on XPS boards (2 cm) with thickness of 8 cm. The surface of the road to be built was approximately 45 m². Subsequently the cement paste was brushed off and the concrete road was cut into 72 panels, sized 80 x 130 cm, that were individually stored on pallets (80 x 130 cm) [Figure 5].

The formula of the mixing ratios MV101 and MV102 resp. the results of the fresh concrete tests according to ONR 23303:2010 (5) are shown in Table 2. The concrete characteristics are shown in Tables 3 and 4.

2.3. Adaptation of the test tunnel

In order to conduct the tests under stable conditions, an already existing test tunnel belonging to the company Junger was adapted [Figs. 6a-6f]. Therefore the floor was asphalted; the tunnel portals were made lightproof using walls resp. sealing them with timber formwork as well as a black coating.

For the measurements one of the two concrete roads, depending on the evaluation condition, was moved or the tarmac surface was retained, the lighting, provided by the company Broll was installed and equipped with the necessary controlling.

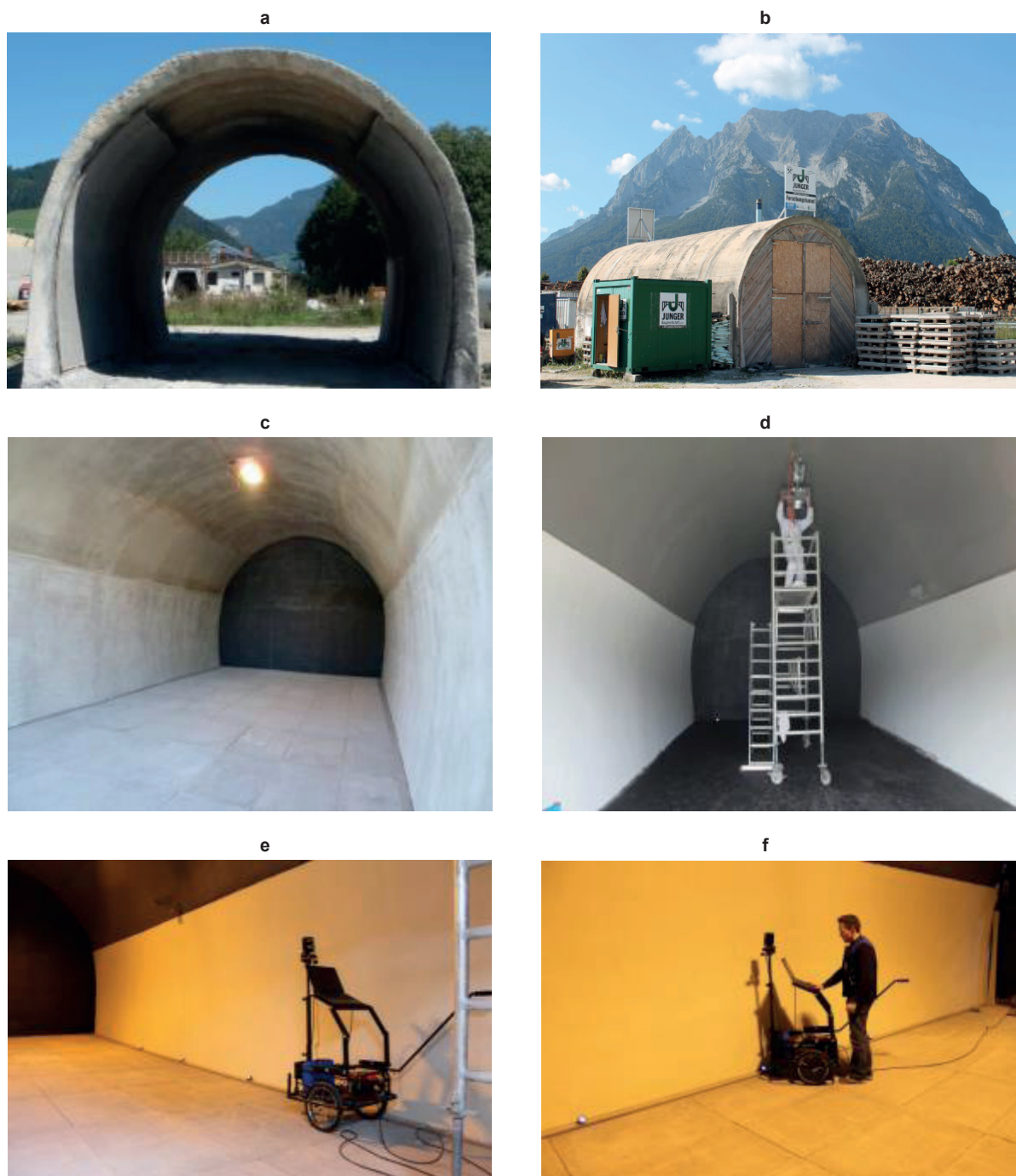
The company Electric Special installed two luminance sensors to determine the luminance on the tunnel's inner layer wall as well as on the road surface. During the trial operations the control cabinet and the control technology were tested using three types of lamps [LED, NAV, HQI].

The setting was designed to reach a basic luminance of 10 cd/m² on the road surface with all three types of lamps.

On Fig. 7. the process of the preparation measures for the measurements of the respectively combinations of roof colour, tunnel walls and road surface is shown.

3.4. Measurements

During the measurements various evaluation conditions [Table 1] were analysed. First task was the construction of the respective surfaces of the tunnel walls by coating them with colours resp. materials. Then, in each case, the road surface resp. the tunnel roof was adapted to the evaluation condition that was to be measured.



Rys. 6. Tunel doświadczalny

a: Tunel doświadczalny Junger w stanie przed adaptacją,

b: Widok z zewnątrz - zaadaptowany tunel z zamkniętymi portalami tunelowym i płytami drogowymi zmagazynowanymi przed tunelem,

c: Zaadaptowany tunel z zaczernionym portalem tunelowym i betonową nawierzchnią,

d: Badanie tunelu z nawierzchnią asfaltową, akceptacja tunelu z „zanieczyszczonym” stropem,

e/f: Pomiar iluminacji prowadzony przez MA 39 – Miejski Urząd Badań, Monitoringu i Certyfikacji Miasta Wiednia (SMG).

Fig. 6. Test Tunnel

a: Original condition of the Junger test tunnel,

b: Exterior view of the for the research project adapted test tunnel with closed tunnel portal and storage of the concrete road in front of the tunnel,

c: Adapted test tunnel with black tunnel portal and concrete road.

d: Test tunnel with tarmac road, tunnel coating acceptance and coated roof „contaminated”.

e/f: Illumination measurement conducted by MA 39 (= Municipal Authority for Testing, Monitoring and Certification of the City of Vienna). [Source: SMG].



a: Układanie nawierzchni drogi
a: Laying of concrete road



b: Układanie płyt bocznych
b: Laying of margin plates



c: Instalacja lamp / Installation of lamps



Rys. 7. Stworzenie warunków oceny w zaadaptowanym tunelu testowym (SMG)

Fig. 7. Creation of evaluation conditions in the adapted test tunnel (Source: SMG)

kamerę ze stałą przestoną (4, 5), stałym zoomem optycznym [18 mm] i z regulowaną czułością (ISO3200). Zdjęcia wykonywano przy różnym ustawieniu oświetlenia, z ludźmi na drodze lub bez. Na rysunku 9 widać moment robienia zdjęć z atrapą samochodu w zaciemnionym tunelu.

3. Wyniki

W trakcie trwania projektu badawczego stworzono i przeanalizowano 36 różnych wariantów oświetleniowych tunelu doświadczalnego. Wyniki pomiarów oraz odpowiednie analizy przedstawiono w postaci wykresów. Moc użytego oświetlenia (HQI, NAV i LED) była porównywalna i wynosiła odpowiednio 100, 100 i 105 watów. Przy pomiarach nawierzchni asfaltowej dane musiały zostać ekstrapolowane ponieważ żaden z rodzajów użytego oświetlenia, przy 100% ich wydajności, nie osiągnął wymaganego poziomu oświetlenia nawierzchni na poziomie 10 cd/m². Na rysunku 10 widać luminancję mierzoną na ścianach tunelu przy wymaganej luminancji nawierzchni wynoszącej 10 cd/m². Dane liczbowe aproksymowano używając funkcji liniowych. Dzięki temu różne

Fig. 8 shows the work process. After the completion of the creation of an evaluation condition according to Table 1, the mounting of one of the three analysed tunnel lighting types took place.

The measurement took place in the lightproof sealed tunnel. The lamps were all adjusted to reach a luminance of 10 cd/m² on the road surface. The luminance of the tunnel's inner shell wall was also integrated into the measurement. After a constant operation was guaranteed, the measurement could be completed and the lamps were exchanged in each case.

Additionally to the metrological quantification of the impact, the changes in the lighting situation of the tunnel were documented on photos. A car dummy was always positioned on the same spot in the tunnel for the optical observation. The measurements [head light distance] of the car dummy were adapted to the reduced tunnel measurements. In order to guarantee comparability, a camera with a constant aperture (4, 5), a constant zoom [18 mm] and regulated ISO-adjustment [3200] was used.

Various pictures during different lighting settings, some with and some without people on the road, were taken. Fig. 9 shows the



a: Tunel przygotowany do pomiaru
a: Tunnel prepared for measurement



b: lampa NAV
b: NAV lamp

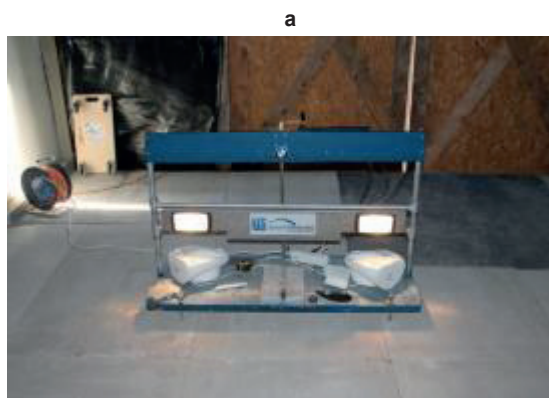


c: Szafka sterownicza do sterowania oświetleniem
c: Control cabinet for lighting control

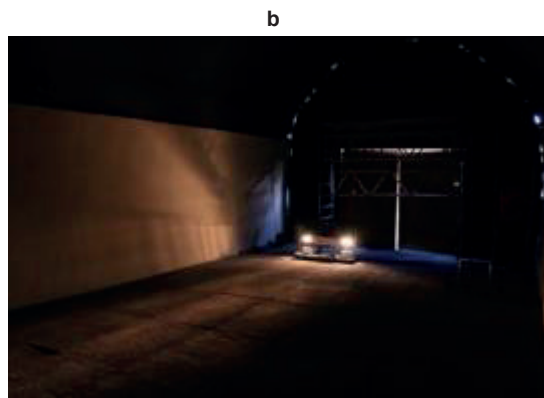


d: Czujnik meteorologiczny
d: Metrological device

Rys. 8. Etapy prac w tunelu doświadczalnym w Irdningu (SMG)
Fig. 8. Working steps in the test tunnel in Irdning (Source: SMG)



a



b

Rys. 9. Analiza widoczności obiektów w tunelu przy różnych powierzchniach, a: atrapa samochodu, b: zdjęcie w zaciemnionym tunelu (SMG)

Fig. 9. Measurement of the visibility analysis of objects in the tunnel by different surfaces, a: car dummy, b: shooting of the picture in the darkened tunnel (Source: SMG)

pokrycia ścian tunelu można uszeregować według natężenia ich luminacji, niezależnie od nawierzchni drogi lub rodzaju oświetlenia.

3.1. Wpływ nawierzchni drogowej

Na początku mierzone wartości podzielono na dwie grupy. Zmierzona wartość „nawierzchnia asfaltowa”, obliczona ekstrapolując wyniki w zakresie od 140% do 165% maksymalnej wydajności

car dummy that was used as well as the shooting of the photos in a darkened tunnel.

3. Results

In the course of the research project 36 evaluation conditions were created and analysed in the test tunnel. The results of the

oświetlenia, tworzy zbiór danych o największym zużyciu energii. Duża wydajność lamp powoduje stosunkowo duże natężenie oświetlenia ścian tunelu. Druga grupa danych obejmuje wartości zmierzone dla nawierzchni „kruszywo eksponowane zwykle” i „kruszywo eksponowane jasne”. Nawet po posegregowaniu danych nie można było dokonać ogólnego rozróżnienia między tymi dwiema nawierzchniami. Wszystkie 4 zmierzone wartości w wariancie „LED, Lekko zanieczyszczony” znajdują się na aproksymowanej linii i wykazują tylko niewielkie rozbieżności w zużyciu energii. Zasadniczo lampy LED są łatwo identyfikowalne w zbiorze danych – rysunek 10, oznaczone linią przerywaną, i zapewniają największą luminancję ścian tunelu przy średnim zużyciu energii.

3.2. Wpływ ścian tunelu

Zgodnie z oczekiwaniami, torkret w kolorze białym daje najlepszy wynik. Niezależnie od rodzaju nawierzchni i rodzaju lamp obserwuje się największe natężenie luminacji ścian tunelu. Porównując oświetlenie NAV i HQI biały torkret również wypada najlepiej, a porównanie ma sens tylko dla wariantu „Bez oznakowania” i „Czysty”, natomiast obserwowane różnice są niewielkie.

Warianty „Stan po odbiorze i „Czysty” pokrycia tunelu są ze sobą porównywalne, co widać na rysunku 10. Szary torkret zapewnia lepsze warunki oświetleniowe niż pokrycie „lekką zanieczyszczoną”, lub „silnie zanieczyszczoną”. Dla tych pokryć powierzchni tunelu zmierzone wartości były najniższe, wynosiły odpowiednio 2,5-10 cd/m² i 5-15 cd/m². Ogólnie można stwierdzić, że różnica w zużyciu energii niezbędnej do oświetlenia nawierzchni drogi, światłem o natężeniu 10 cd/m², pomiędzy wariantami „Po odbiorze” i „Czysty” jest niewielka. Jest to widoczne w analizie zbioru danych z lampami HQI i NAV – lewa dolna część diagramu, rysunek 10. Przy oświetleniu NAV i HQI wszystkie warianty oceny wykazały podobne zużycie energii, wynoszące od około 40 do 60% maksymalnej mocy. Jedną z oczywistych korzyści czyszczenia tuneli jest zwiększenie bezpieczeństwa drogowego. Luminacja ścian tunelu „Silnie zanieczyszczony” wzrasta po doprowadzeniu do „Czysty” z 2,5 cd/m² do 8-10 cd/m², powodując trzykrotny wzrost natężenia światła.

3.3. Wyniki pomiarów luminancji przeprowadzonych przez MA 39 – Urząd Miejski Badań, Monitoringu i Certyfikacji Miasta Wiednia

Miejski Urząd Badań, Monitoringu i Certyfikacji Miasta Wiednia został wyznaczony do przeprowadzenia pomiarów warunków luminancji w tunelu, w przypadku różnych wariantów nawierzchni i kolorach powierzchni wewnętrznej. Pomiary wykonywano w oparciu o normę ÖNORM EN 13201-4: 2005 (6), wykorzystując kamerę do pomiaru luminancji przestrzennej o wysokości 1,5 m i fotometr wyposażony w głowicę do pomiaru natężenia oświetlenia. Na rysunku 11 przedstawiono średnie wartości pomiarów luminancji = średnie wartości dla lamp HQI, NAV, LED, na różnych nawierzchniach. Mierzona luminacja przy takich samych poziomach oświetlenia jest ponad pięciokrotnie większa na nawierzchniach betonowych –

measurements and the according analyses are depicted in the form of diagrams. The power of the three lamp types HQI, NAV and LED are comparable to 100, 100 and 105 watts. The lamps' performance data needed to be extrapolated for the road surface tarmac, as none of the lamps reached for the comparison necessary 10 cd/m² lighting intensity of the road surface, at 100% of their performance range.

Fig. 10. shows the luminance on the tunnel walls depending on the necessary luminance of 10 cd/m² of the necessary power of the lamps on the road surface. The data points are being approximated depending on the luminosities on the tunnel wall surface using linear functions. Doing so the various tunnel paint systems can be ranked by their lighting intensity independent from the road surface or the lamp system.

3.1. Influence of the road surface

To begin with the measured values can be divided into two groups. The measured value „road surface asphalt”, calculated using extrapolation, ranging between 140% and 165% of the maximum performance, forms the dataset with the highest power consumption. The high lamp performances result inevitably in relatively high lighting intensities on the tunnel walls.

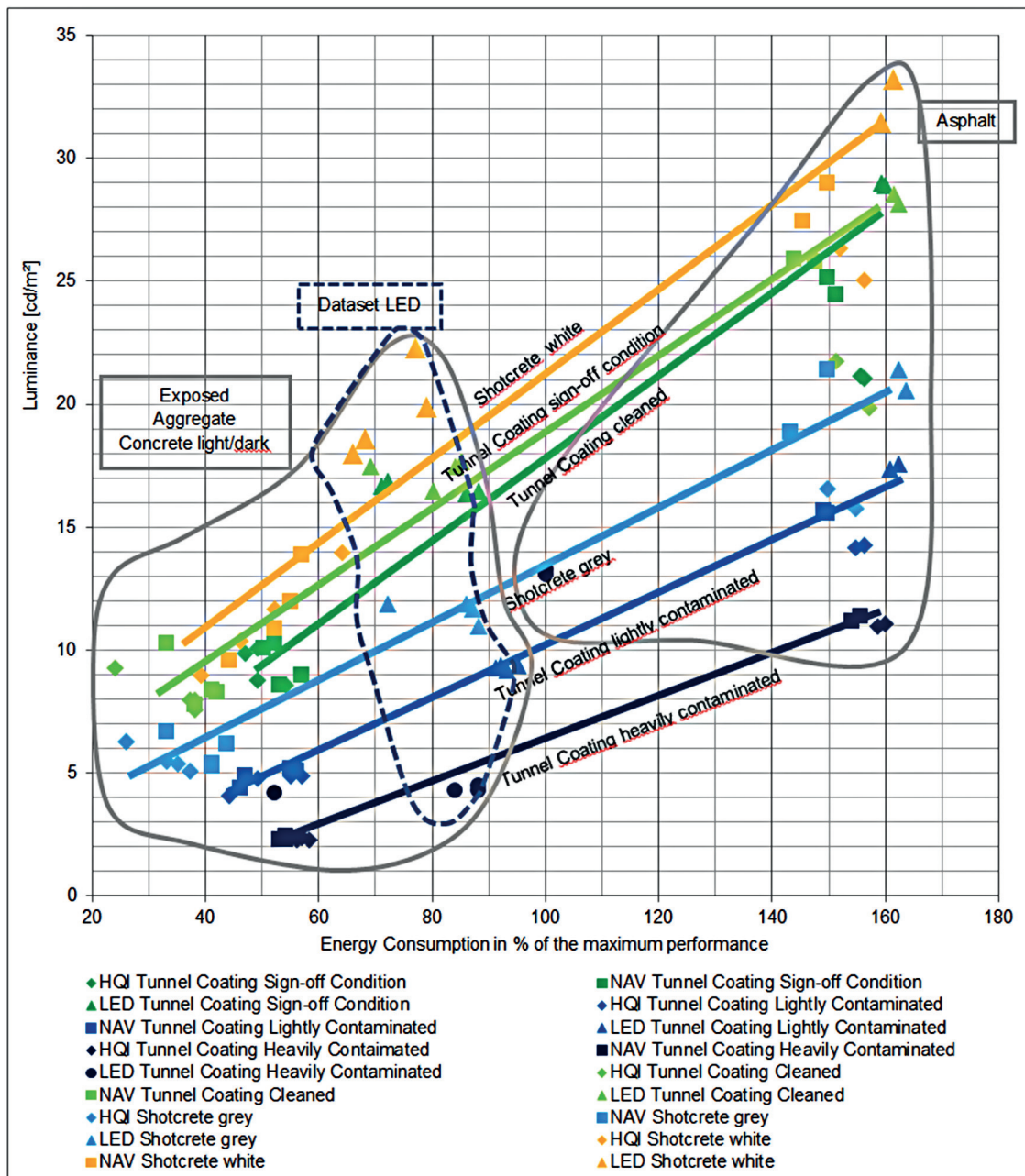
The second data cloud includes the measured values of the road surfaces “common exposed aggregate concrete” and “light exposed aggregate concrete”. Even with clear allocation of data points, no general distinction between the two road surfaces could be made. All 4 data points “LED tunnel coating light contamination” are located on approx. one line for example and only show little discrepancies in the power consumption. In general the LED-lamps can be demarcated in the data cloud [Fig. 10, marked by the dotted line]. They provide the highest luminance on the tunnel wall during medium energy consumption.

3.2. Influence of the tunnel walls

As expected, the shotcrete in white delivers the best result. Regardless of road and lamp type, it presents the highest lighting intensities on the tunnel wall. In comparison of the shotcrete in white under NAV and HQI lighting, the white shotcrete also performs best, but the lighting intensities can absolutely be compared to the tunnel coating „sign-off condition” and „cleaned”. The differences here are only minor.

The tunnel coatings „acceptance condition” and „cleaned” show definitely comparable progressions in Figure 10 too. The grey shotcrete again delivers better values than the lightly resp. heavily contaminated tunnel coating. The heavily resp. lightly contaminated tunnel coating presents the lowest values with 2.5-10 cd/m² resp. 5-15 cd/m².

In general it can be said, that the influence of a cleaned resp. new tunnel wall colour on the power consumption that is necessary for the lighting of the road surface with a light intensity of 10 cd/m² is little. This becomes apparent with the analysis of the dataset with



Rys. 10. Zestawienie mierzonych wartości pogrupowanych zgodnie z pokryciem ścian tunelu. Biały torkret zapewnia największą intensywność luminacji ścian tunelu

Fig. 10. Complete overview of measured values, coloured according to tunnel wall coating. The white shotcrete provides the highest lighting intensities on the tunnel wall

eksponowane kruszywo jasne: 16,9 cd/m², eksponowane kruszywo zwykłe: 15,0 cd/m² i asfalt: 2,9 cd/m².

Na rysunku 12 pokazano część pomiarów luminancji dla wariantu „Stan po odbiorze” wykonanego przez MA 39.

Wyniki pomiarów luminancji wyraźnie pokazują różnice pomiędzy nawierzchniami asfaltową [niebieski] a betonową. Na rysunku 13 pokazano wyniki pomiarów luminancji graficznie, z wykorzystaniem wykresów słupkowych, przeprowadzonych przez MA 39, dla wariantu „Stan po odbiorze”. Aby ułatwić ocenę pokazano wariant z czystym stropem.

the lamp types HQI and NAV at the left lower area of the diagram in Fig. 10. During NAV and HQI lighting, all evaluation conditions result in similar energy consumption, ranging between approx. 40% and 60% of the maximum power.

Though, one obvious benefit of a tunnel cleaning is the increase in road safety. The brightness of the tunnel wall for example increases from „heavily contaminated” to „cleaned” from 2.5 cd/m² to 8-10 cd/m², resulting in a threefold increase of the irradiance of the tunnel wall.

Luminancja ścian tunelu znacznie wzrasta przy nawierzchniach betonowych, w związku z tym najlepsze wyniki uzyskano dla nawierzchni betonowej jasnej. W układzie z eksponowanym kruszywem jasnym luminancja jest o 21%, a przy kruszywie zwykłym o 15%, większa niż w przypadku asfaltowej nawierzchni.

Różnica w luminancji dla różnych nawierzchni przedstawia się następująco:

Asfalt [cd/m²]:

2,6 (HQI) 3,6 (NAV) 1,5 (LED)

Ekspozowane kruszywo jasne [cd/m²]:

17,7 (HQI) 25,4 (NAV) 12,4 (LED)

Ekspozowane kruszywo zwykłe [cd/m²]:

15,5 (HQI) 21,6 (NAV) 11,4 (LED)

Pomimo dużej luminancji ścian tunelu, luminancja nawierzchni asfaltowej nie przekracza 5 cd / m².

3.4. Luminancja nawierzchni – zwiększenie bezpieczeństwa

Już w 1987 roku McIntosh (7) pisał o pozytywnych aspektach budowy dróg betonowych w porównaniu z drogami asfaltowymi, pod kątem współczynnika odbicia światła i związanej z tym zwiększonej jasności i widoczności obiektów ważnych dla ruchu drogowego. W ramach realizacji projektu badawczego oraz w celu zwiększenia bezpieczeństwa użytkowania dróg, przeprowadzono badania w tunelu doświadczalnym w zdefiniowanych i porównywalnych warunkach oraz wykonano dokumentację zdjęciową.

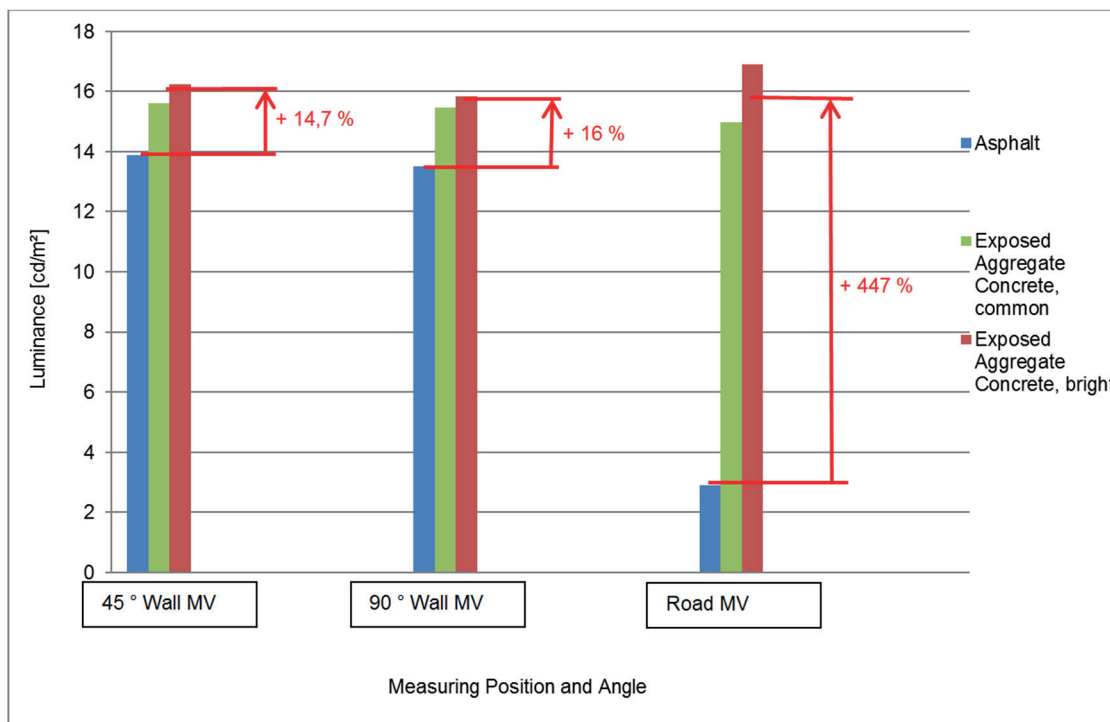
3.3. Results of the luminance measurements conducted by the MA 39 = Municipal Authority for Testing, Monitoring and Certification of the City of Vienna

The Municipal Authority for Testing, Monitoring and Certification of the City of Vienna [Municipal Authority 39] was assigned to conduct a metrological determination of the luminance and the colour information of tunnel surfaces in various evaluation conditions. The measurement of the luminance and the colour information took place situational following the ÖNORM Standard EN 13201-4: 2005 (6), using a spatially resolved luminance camera at a height of 1.5 m. A photometer equipped with an illumination measuring head was used as instrument.

On Fig. 11. the average values of the luminance measurements – average values of lamp types HQI, NAV, LED on different roads. The lighting intensities during the same illumination levels are more than 5 times higher on concrete roads (exposed aggregate concrete light: 16.9 cd/m², exposed aggregate concrete common: 15.0 cd/m² and asphalt: 2.9 cd/m² are shown.

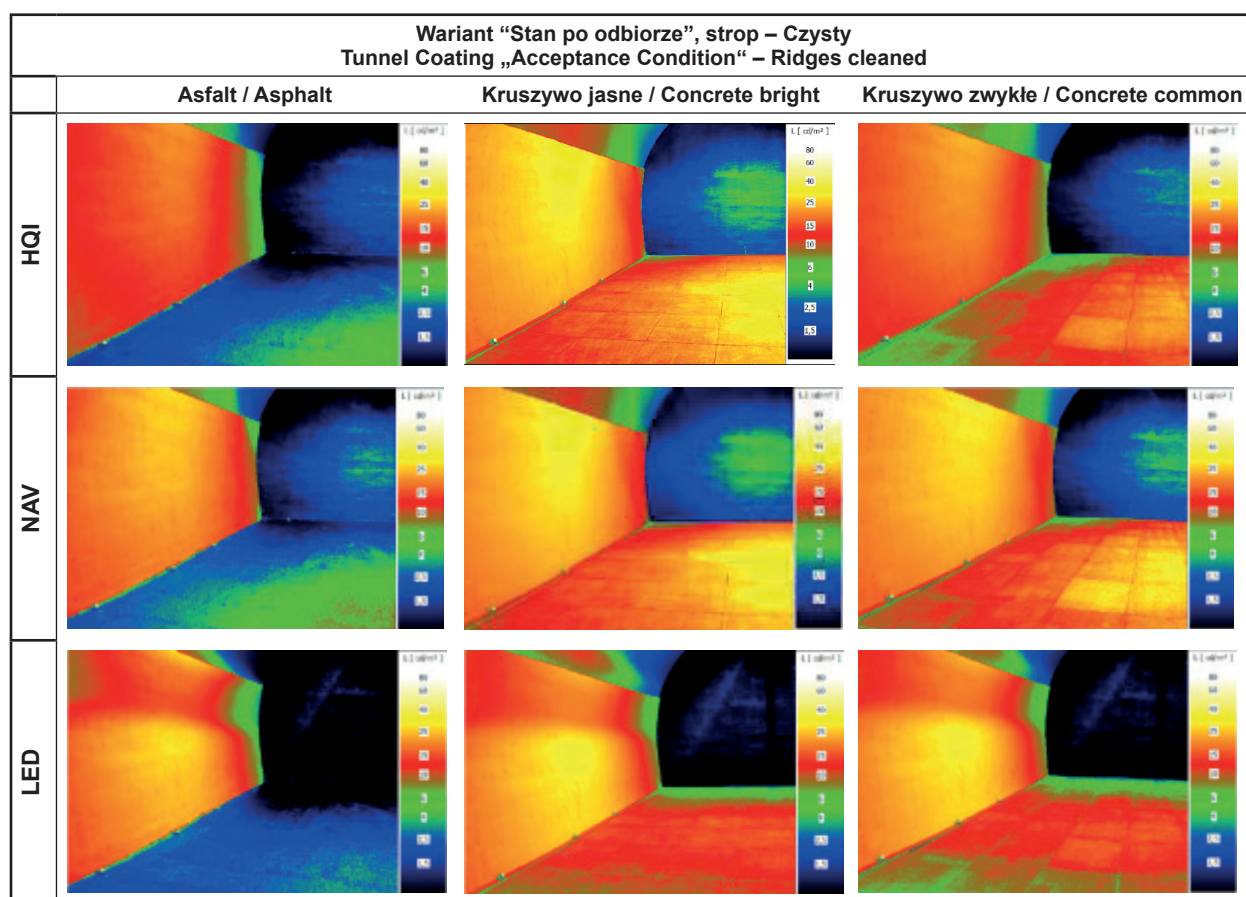
Fig. 12. shows an excerpt of the luminance images for the tunnel wall coating „sign-off condition“, that was made by MA 39.

The luminance images clearly depict the differences between asphalt (blue) and the concrete roads. Fig. 13. shows the results of the luminance measurements, conducted by MA 39, graphically using bar charts for „tunnel wall acceptance condition“. In order to



Rys. 11. Luminancja ściany tunelu na różnych nawierzchniach i pod różnymi kątami. Pokazano średnie ważone wariantów „Zanieczyszczony strop” i „Czysty strop” z wykorzystaniem lamp NAV, HQI oraz LED

Fig. 11. Luminance of the tunnel wall on various roads and at various measuring angles. In each case the weighted averages of the evaluation condition „roof contaminated” and „roof cleaned” as well as the lamp types NAV, HQI and LED are shown



Rys. 12. Wyniki pomiarów luminancji w tunelu doświadczalnym z wykorzystaniem asfaltu, betonów z eksponowanym kruszywem zwykłym i jasnym, w przypadku małego zanieczyszczenia i czystego stropu, pokrycie ścian – „stan po odbiorze” (MA 39)

Fig. 12. Luminance images of the test tunnel using asphalt, exposed aggregate concrete, common and exposed aggregate concrete, light and cleaned ridge. Tunnel coating: tunnel wall acceptance condition (Fig. MA 39)

Badania przeprowadzono w zaciemnionym tunelu przy użyciu atrapy samochodu, przy włączonych światłach długich lub mijania oraz przy takich samych ustawieniach aparatury. Rysunki 14–16 przedstawiają widoczność w tunelu, bez włączonego oświetlenia tunelowego.

Generalnie drogi betonowe są znacznie jaśniejsze i lepiej oświetlane światłami mijania. Różnice pomiędzy eksponowanym kruszywem jasnym i zwykłym można określić poprzez nieco mniejsze natężenie oraz „łagodniejszy” kolor wiązki światła. Różnice widać na rysunkach 14 i 15. Większa jasność i luminacja betonu ułatwiają znacznie wcześniejsze wykrywanie obiektów ważnych dla ruchu drogowego, na przykład obecność pieszych. Nawierzchnia asfaltowa [rysunek 16] jest słabo oświetlona przez światła mijania, a zatem wykrywanie obiektów na drodze jest opóźnione. Podobne wyniki uzyskano stosując „światła długie”. Beton odbija większą ilość światła, co powoduje lepsze oświetlenie obszaru ruchu. Jednak mierzone różnice nie są tak duże, jak w przypadku światła mijania, ponieważ reflektory światła długich są ustawione wyżej i bardziej skupione, a zatem mniej światła dociera do nawierzchni i odbija się od niej.

3.5. Oszczędność kosztów oświetlenia

Ocenę kosztów oświetlenia wykonano w oparciu o zużycie energii w stosunku do uzyskanej mocy wyjściowej. Rysunek 17 przedsta-

create better comparability, the evaluation conditions are shown with cleaned ridges.

The luminance of the tunnel walls is significantly increased on concrete roads, whereby the best results can be achieved with the bright concrete road. Thereby the luminance increases by an average of 21% during the change from „asphalt” to „exposed aggregate concrete, bright” resp. by 15% during the change to exposed aggregate concrete, common.

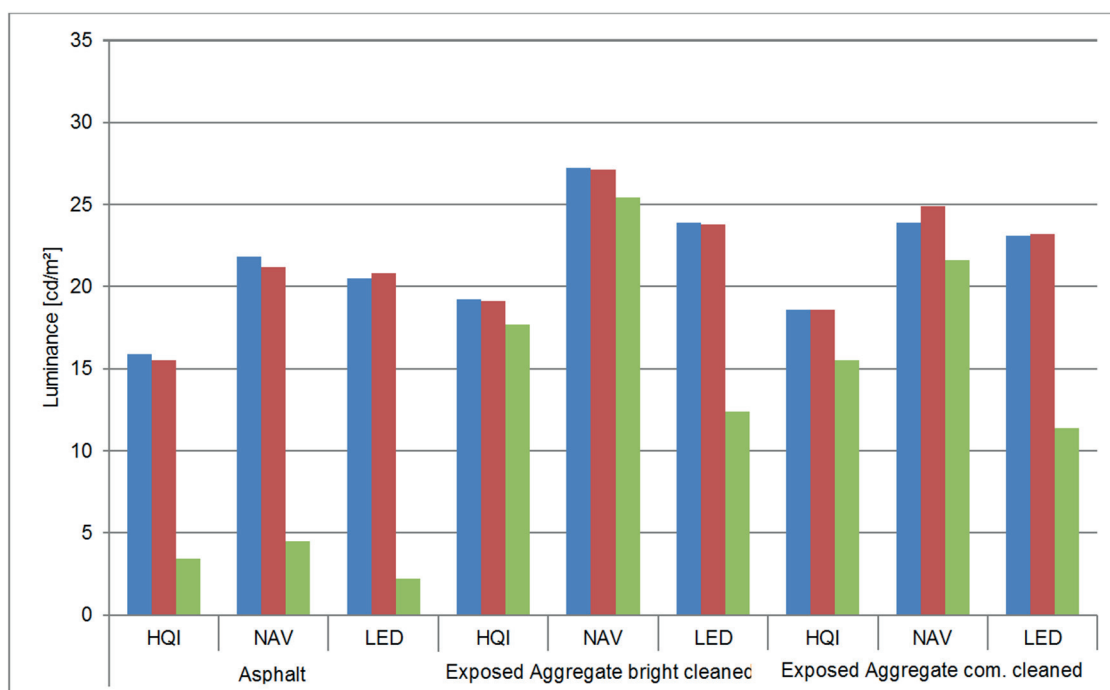
The difference in the luminance of the road surface is even clearer:

Asphalt [cd/m ²]:	2,6 (HQI)	3,6 (NAV)	1,5 (LED)
Exposed Aggregate Concrete, light [cd/m ²]:	17,7 (HQI)	25,4 (NAV)	12,4 (LED)
Exposed Aggregate Concrete, common [cd/m ²]:	15,5 (HQI)	21,6 (NAV)	11,4 (LED)

Despite of the high luminance of the tunnel wall, the luminance of the road surface asphalt does not exceed 5 cd/m².

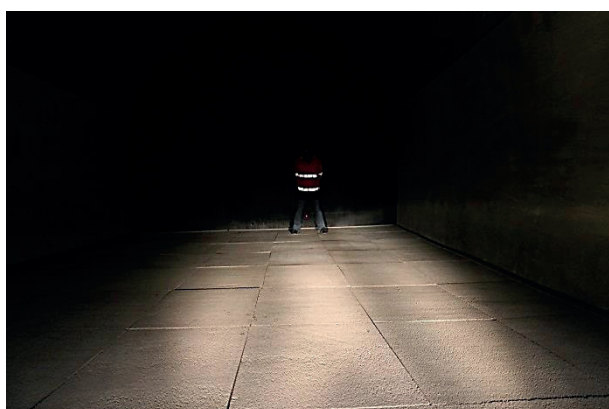
3.4. Illumination of road surfaces – increase in road safety

Already in 1987, McIntosh (7) reported about the positive impact of concrete roads in comparison to asphalt roads with regard to



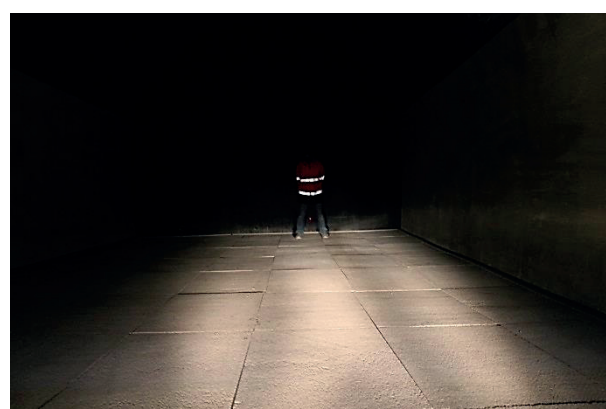
Rys. 13. Luminancja ścian tunelu – kąty oświetlenia 45° i 90° oraz nawierzchni w wariantach: „Stan po odbiorze” przy różnych nawierzchniach i rodzajach lamp. Strop tunelu „Czysty”

Fig. 13. Luminance on tunnel wall (viewing angles 45° and 90°) as well as road surface using „tunnel coating acceptance condition” and different road surfaces and lights [all cleaned ridge]



Rys. 14. Ściana lekko zanieczyszczona, strop czysty, beton z kruszywem zwykłym

Fig. 14. Wall lightly contaminated, roof cleaned, concrete common



Rys. 15. Ściana lekko zanieczyszczona, strop czysty, beton jasny

Fig. 15. Wall lightly contaminated, roof cleaned, concrete bright reflectivity and the related increased brightness and visibility of objects in traffic. Within the framework of the research project and in order to visualise the increased road safety, tests were conducted under uniformed and comparable conditions in a test tunnel and photographs were taken.

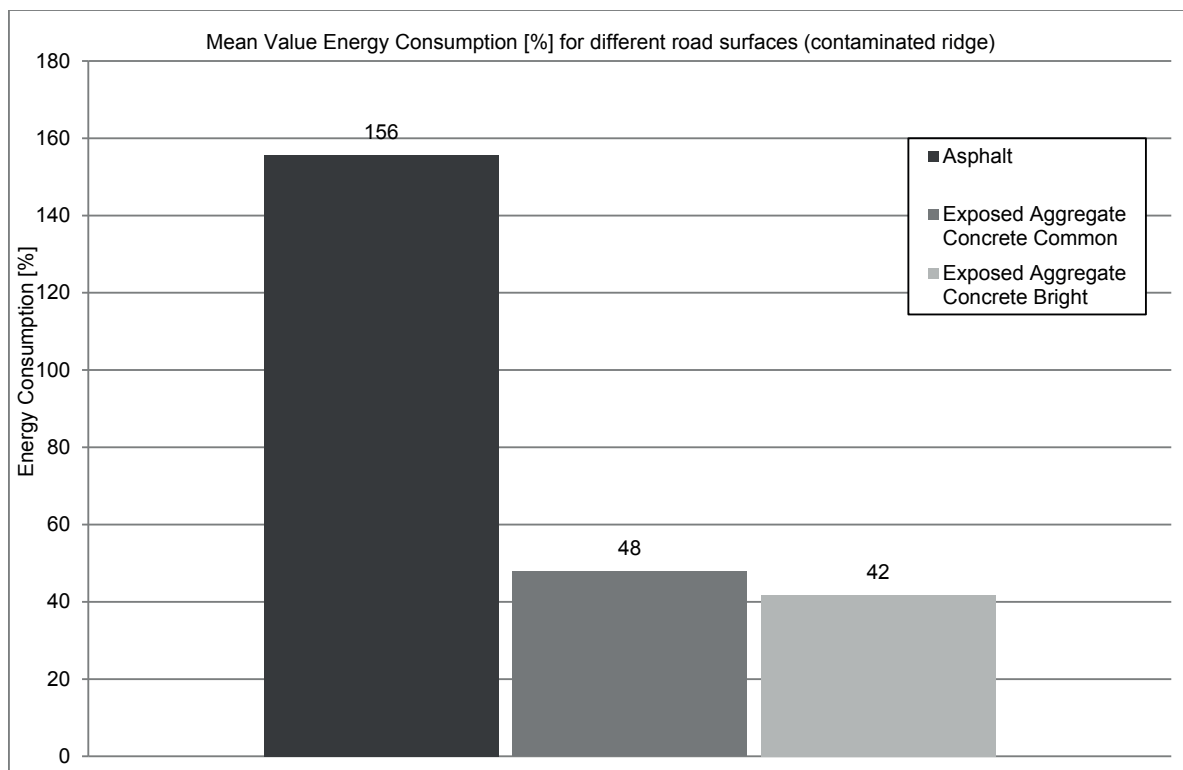


Rys. 16. Ściana lekko zanieczyszczona, strop czysty, asfalt

Fig. 16. Wall lightly contaminated, roof cleaned, asphalt

To demonstrate the increase in road safety, the tests were reconstructed under constant and therefore comparable conditions in the test tunnel and photos were taken within the framework of the research project. The tests took place in the darkened tunnel using the car dummy resp. with the high and low beam lights turned on using the same camera settings. Figs. 14, 15 and 16 show comparable photos of the visibility conditions without light in the tunnel.

In general concrete roads are significantly brighter and better illuminated by low beam. Differences between exposed aggregate



Rys. 17. Średnie zużycie energii przez lampy HQI w % jej maksymalnej wydajności, przy natężeniu oświetlenia 10 cd/m² dla wszystkich badanych nawierzchni drogowych i kolorów ścian tunelu

Fig. 17. Mean value of the performance of an HQI-lamp in % of its maximum performance during a lighting intensity of 10 cd/m² for all examined road surfaces and tunnel wall colours

wia w procentach średnie rzeczywiste zużycie energii przez lampę HQI, przy oświetleniu różnych nawierzchni drogowych do wartości luminacji 10 cd/m², uwzględniając wszystkie warianty kolorów ścian tunelu. W przypadku nawierzchni asfaltowej wykorzystano ekstrapolowane wartości wydajności (Rysunek 10) i porównano je ze średnią wartością nawierzchni betonowych, z eksponowanym kruszywem jasnym i zwykłym.

Należy podkreślić, że aby osiągnąć luminancję nawierzchni asfaltowej na poziomie 10 cd/m², konieczne jest stosowanie bardzo wydajnych lamp, których zużycie energii czasami czterokrotnie przekracza ilość energii potrzebnej do oświetlenia nawierzchni betonowej. Trzeba zaznaczyć, że dane pomiarowe pochodzą tylko od jednej lampy. Właściwości nawierzchni asfaltowej powodują, że nawet przy 100% mocy lamp nie można było osiągnąć wymaganej luminacji nawierzchni, rzędu 10 cd/m². Aby możliwe było porównanie dokonano liniowej ekstrapolacji wyników. Wpływ koloru ścian tunelu nie ma większego wpływu na luminację nawierzchni, zatem pominięto go w zamieszczonym zestawieniu wyników.

4. Podsumowanie

W trakcie projektu badawczego przeprowadzono symulacje i poddano ocenie wiele różnych wariantów oświetleniowych. Wpływ rodzaju nawierzchni drogowej na właściwości fotometryczne tunelu uznano za ważny. Drogi z nawierzchnią betonową wymagają znacznie mniejszej wydajności zainstalowanego oświetlenia, niezależnie od jego rodzaju. W przypadku nawierzchni betonowej,

concrete bright and exposed aggregate concrete common are possibly detectable by the slightly darker resp. softer colour of the light beam in Fig. 14., compared to the whiter light beam in Fig. 15. The enhanced brightness and the increased reflectivity of the concrete make it easier to detect objects - such as a pedestrian - significantly earlier and better. The asphalt road, depicted in Fig. 16., is only weakly illuminated by the low beam and therefore the detection of objects on the road is delayed and decreased.

Similar results can be derived using high beams. Concrete reflects a higher ratio of the light and therefore leads to a better illumination of the traffic area. The differences are still not as high as when using the low beam, as the high beam is adjusted higher and more focused and therefore less light reaches the road and reflects from there.

3.5. Savings of the lighting costs

The evaluation of the lighting costs took place based on the energy consumption in relation to the maximum output. Fig. 17 presents the mean value of the actual energy consumption of the maximal output of an HQI-lamp during the lighting intensity of different road surfaces of 10 cd/m² over all tunnel wall colours in percent. For asphalt, the extrapolated performance values from Fig. 10. were used and compared to the mean value of the concrete roads „exposed aggregate concrete bright” and “exposed aggregate concrete common”.

It is remarkable that in order to reach a luminance of 10 cd/m², high performance of a lamp for asphalt roads is necessary, some-

w takich samych warunkach otoczenia, moc lampy teoretycznie może zostać zmniejszona o dwie trzecie w porównaniu do nawierzchni asfaltowej. Różnice wynikające z zastosowania kruszywa zwykłego lub o zwiększonej jasności, przez dodatek bieli tytanowej do betonu, mają niewielki wpływ. Ogólnie rzecz biorąc, obiekty ważne dla ruchu drogowego, na przykład osoby poruszające się pieszo, można wykryć znacznie wcześniej dzięki większej luminancji i lepszemu współczynnikowi odbicia światła od betonu. Beton odbija więcej światła i dlatego pośrednio zapewnia lepsze oświetlenie obszaru ruchu. Różnice między eksponowanym kruszywem zwykłym i jasnym, na zdjęciach z atrapą samochodową oraz pieszymi, są prawie niezauważalne. Obrazy intensywności luminancji wykonane przez MA 39 ukazują niewielką różnicę w luminancji na drogach i ścianach tunelu i potwierdzają subiektywne wrażenie. Zmierzone natężenia oświetlenia również potwierdzają tę obserwację: luminancja przy takim samym poziomie oświetlenia jest w przybliżeniu o 450% większa na nawierzchniach betonowych.

References / Literatura

1. DIN 67 524: Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen - Teil 1: Allgemeine Gütermerkmale und Richtwerte, Juli 2008.
2. DIN 67 524: Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen - Teil 2: Berechnung und Messung, Juni 2011.
3. RVS 09.02.41: Tunnel. Tunnelausrüstung. Lichttechnik. Beleuchtung. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr. Wien., Februar 2014.
4. RVS 08.17.02: Technische Vertragsbedingungen. Betondecken. Deckenherstellung. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr. Wien. 2011.
5. ONR 23303: Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe. Austrian Standards Institute, Wien. 2010.
6. ÖNORM EN 13201-4: „Straßenbeleuchtung. Teil 4: Methoden zur Messung der Gütermerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen“, Austria Standards Institute, Wien. 2005.
7. McIntosh, B.: Do Concrete Streets really reflect up?; Concrete International, July 1987.

times reaching four times the energy consumption that is needed when using a concrete road. The reason for this big difference is that the data of these measurements comes from one lamp only. The asphalt surface is designed in such a way that lamps even at 100% of their maximum output do not reach the necessary lighting intensities of 10 cd/m² on the road surfaces. In order to restore comparability, the performances were then aligned using linear extrapolation. The influence of the tunnel wall colour is insignificant to the lighting intensity on the road and therefore also for the energy consumption and is consequently not presented in this Fig.

4. Summary

In the course of the research project a variety of different lighting situations were simulated and subsequently evaluated.

The positive impact of a concrete road on the photometric characteristics of a tunnel can be assessed as substantial. In order to guarantee the necessary luminance on the road, concrete roads require significantly lower lamp performance independent from the lamp type. At the same time, the lamp power can theoretically be decreased by two thirds compared to asphalt roads. The influence on the necessary lamp wattage between common concrete pavements and concrete pavements, that have been supplemented with titanium oxide, is negligible. In general, objects, such as a pedestrian for example, can be detected significantly earlier and better due to increased brightness and the better reflectivity of the concrete. The concrete reflects a higher proportion of the light and therefore ensures a better indirect lighting of the traffic area. The differences between “exposed aggregate concrete bright” and “exposed aggregate concrete common” can hardly be detected on the pictures with simulated car headlights and pedestrians. The luminance images of the MA 39 visualise the small difference in luminance on the roads and the tunnel walls and confirm the subjective impression. The measured lighting intensities also confirm this observation: The measured lighting intensities also confirm this observation: The luminance during the same illumination level is approx. 450% higher on concrete roads.