

**DOMINIKA MALISZEWSKA¹⁾**

ORCID: 0000-0002-4319-7603

MACIEJ MALISZEWSKI²⁾

ORCID: 0000-0002-0355-3319

THE EFFECTIVENESS OF WARSAW WEEKEND ROAD REHABILITATIONS BASED ON DEFLECTION BASIN INDICES ANALYSIS AND PAVEMENT STIFFNESS ANALYSIS

OCENA EFEKTYWNOŚCI REMONTÓW WEEKENDOWYCH ULIC WARSZAWY NA PODSTAWIE PARAMETRÓW CZASZY UGIĘĆ I SZTYWNOŚCI KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI

STRESZCZENIE. Praca stanowi kontynuację badań nad efektywnością weekendowych remontów ulic Warszawy, nawiązującą do wyników zaprezentowanych w poprzednim artykule pt.: „Weryfikacja efektywności remontów weekendowych ulic Warszawy na podstawie parametrów czaszy ugięć”. Celem pracy jest analiza trwałości zastosowanych rozwiązań projektowych na podstawie pomiarów wykonanych w trzech kluczowych etapach: w 2016 roku (przed remontem) oraz w 2019 i 2022 roku – odpowiednio trzy i sześć lat po zakończeniu remontu. W ramach tych działań przeprowadzono badania diagnostyczne i przeanalizowano parametry czaszy ugięć oraz zmiany parametrów sztywności (E1, E2, E3) konstrukcji nawierzchni wybranych odcinków ulic. Wyniki wykazały istotne zmiany parametrów w czasie, co pozwoliło na ocenę długoterminowej efektywności zastosowanej technologii remontu. Planowane są dalsze obserwacje w celu opracowania modeli prognostycznych i wyciągnięcia wniosków dotyczących trwałości nawierzchni w kolejnych latach eksploatacji.

SŁOWA KLUCZOWE: nośność konstrukcji, ocena nośności, parametry czaszy ugięć, technologia remontu nawierzchni, moduły sztywności, gospodarka o obiegu zamkniętym.

ABSTRACT. The paper presents a continuation of research on the effectiveness of weekend street repairs in Warsaw, building upon the results presented in the previous paper entitled: “The effectiveness of weekend road rehabilitations in Warsaw on the basis of deflection basin indices”. The aim of the current study was to analyse the durability of the applied design solutions based on measurements taken at three key stages: in 2016, before the repair; in 2019, three years after the repair; and in 2022, six years after the repair. Diagnostic tests were conducted, and deflection bowl parameters as well as changes in stiffness parameters (E1, E2, E3) of the pavement structure on selected street sections were analysed. The results revealed significant changes over time, enabling evaluation of the long-term effectiveness of the repair technology. Further observations are planned to develop predictive models and draw conclusions regarding the durability of the pavement in the coming years of operation.

KEYWORDS: structure bearing capacity, load capacity, load-bearing capacity assessment, load capacity evaluation, deflection basin parameters, pavement rehabilitation technology, stiffness moduli, circular economy.

DOI: 10.7409/rabdim.024.018

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; dominika.maliszewska@ibdim.edu.pl (✉)

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; maciej.maliszewski@ibdim.edu.pl

1. WSTĘP

Weekendowe remonty ulic Warszawy, realizowane od początku XXI wieku, są efektem wieloletnich doświadczeń i badań nad trwałością nawierzchni miejskich. Wstępna ocena efektywności tych remontów, przeprowadzona przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM) w 2003 roku, wskazywała, że ponad połowa nawierzchni zarządzanych przez Zarząd Dróg Miejskich wymagała przebudowy lub wzmocnienia, co wiązało się z koniecznością optymalizacji kosztów i działań remontowych [1]. W odpowiedzi na te potrzeby, w latach 2004-2009 wdrożono weekendowe remonty ulic, które miały na celu szybkie poprawienie stanu technicznego nawierzchni przy minimalizacji zakłóceń w ruchu drogowym [2].

Dotychczasowe analizy efektywności technologii remontowej, bazujące głównie na ocenach wizualnych stanu nawierzchni i pomiarach ugięć, wykazały, że wybrane technologie są skuteczne, ale wymagają dalszej weryfikacji i dostosowania do specyficznych warunków miejskich [3]. W 2016 roku wdrożono bardziej zaawansowane metody diagnostyczne, w tym badania z użyciem ugięciomierza dynamicznego (FWD), które pozwalają na wyznaczenie modułów sztywności konstrukcji nawierzchni.

W poprzednim artykule [4] szczegółowo omówiono metodykę postępowania przy projektowaniu wzmocnienia remontowanej nawierzchni. Ponadto w analizie skupiono się na ocenie parametrów czaszy ugięć przed remontem (w 2016 roku) oraz po trzech latach eksploatacji (w 2019 roku). Wyniki te stanowiły wstępną ocenę skuteczności zastosowanych rozwiązań, jednak brakowało analizy szczegółowej modułów sztywności. Niniejszy artykuł, oprócz uzupełnienia wyników badań kształtu czaszy ugięć przeprowadzonych w 2022 r., zawiera analizę modułów sztywności (E1, E2, E3) oznaczonych w 2019 r. (trzy lata po remoncie) i 2022 r. (sześć lat po remoncie).

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki analizy modułów pozwalają na ocenę długoterminowej efektywności zastosowanych technologii remontowych oraz na identyfikację kluczowych czynników wpływających na trwałość nawierzchni w warunkach miejskich.

W ramach badań przeprowadzono także uproszczoną analizę pomocniczą, mającą na celu zbadanie zależności między ogólnym stanem technicznym nawierzchni na sieci dróg zarządzanych przez ZDM a wymaganą powierzchnią remontowanej nawierzchni. Analizę tę oparto

1. INTRODUCTION

The weekend rehabilitations of Warsaw's streets, carried out since the beginning of the 21st century, are the result of years of experience and research into the durability of urban pavements. A preliminary assessment of the effectiveness of these repairs, carried out by the Road and Bridge Research Institute (IBDiM) in 2003, indicated that more than half of the pavements managed by the Public Roads Authority (ZDM) required reconstruction or strengthening, which implied a need to optimise costs and repair activities [1]. In response to these needs, weekend road rehabilitations were implemented between 2004 and 2009 with the aim of quickly improving the condition of the pavement while minimising traffic disruption [2].

Previous analyses of the effectiveness of rehabilitation technology, based mainly on visual assessments of pavement condition and deflection measurements, have shown that the selected technologies are effective, but require further verification and adaptation to specific urban conditions [3]. In 2016, more advanced diagnostic methods were implemented, including Falling Weight Deflectometer (FWD) tests to determine the stiffness moduli of the pavement structure.

The previous paper [4] discussed in detail the methodology for proceeding with the design of reinforcement for rehabilitated pavements. In addition, the analysis focused on assessing the parameters of the deflection basin before rehabilitation (in 2016) and after three years of operation (in 2019). These results provided a preliminary assessment of the effectiveness of the solutions applied, but detailed analysis of the stiffness moduli was lacking. This paper, in addition to supplementing the results of the deflection basin shape tests carried out in 2022, includes an analysis of the stiffness moduli (E1, E2, E3) determined in 2019 (three years after rehabilitation) and 2022 (six years after rehabilitation).

The results of the module analysis presented in this paper allow the long-term effectiveness of the rehabilitation technologies used to be assessed and the key factors affecting pavement durability in urban conditions to be identified.

As part of the study, a simplified auxiliary analysis was also carried out to investigate the relationship between the overall pavement condition on the road network managed by the Public Roads Authority (ZDM) and the required

na danych z przeglądów pięcioletnich prowadzonych przez IBDiM w 2003 i 2018 roku oraz na podstawie danych o ilości ulic remontowanych rocznie przez ZDM. Dla uproszczenia przyjęto założenie, że degradacja nawierzchni na sieci drogowej przebiega w sposób liniowy, a przeprowadzone remonty przywracają w 100% wskaźnik stanu ogólnego wyremontowanej nawierzchni. Wyniki tej analizy wykazały, że do utrzymania na niezmiennym poziomie udziału dróg niewymagających remontu, ZDM powinien prowadzić remonty na ok. 1,5-3,3% powierzchni sieci drogowej rocznie. Zmniejszenie ilości naprawianych dróg poniżej tego poziomu będzie prowadzić do zmniejszenia udziału dróg niewymagających naprawy. Zwiększenie ilości powyżej 3,3% powierzchni rocznie może prowadzić do zwiększenia udziału dróg niewymagających naprawy. W przypadku sieci dróg ZDM najczęściej remontów zaplanowano w latach 2005-2010. W tym okresie wzrosła ilość odcinków, na których remont nie był wymagany. W latach 2011-2018 ilość odcinków remontowanych rocznie pozwoliła utrzymać stan infrastruktury niewymagającej napraw na niezmiennym poziomie. Po roku 2019 ilość naprawianych ulic wyraźnie zmniejszyła się, zatem udział odcinków niewymagających naprawy zmalał. Graficzną interpretację tej analizy przedstawia Rys. 1.

pavement area to be repaired. This analysis was based on data from the IBDiM's five-year reviews in 2003 and 2018 and on the number of streets repaired annually by the Public Roads Authority. For the sake of simplicity, it has been assumed that pavement degradation on the road network is linear and that the repairs carried out restore the overall condition index of the rehabilitated pavement to 100%. The results of this analysis showed that, in order to keep the proportion of roads that do not need repair unchanged, the Public Roads Authority should carry out repairs on approximately 1.5-3.3% of the road network area per year. Reducing the number of repaired roads below this level will lead to a reduction in the proportion of roads that do not require repair. An increase of more than 3.3% of the area per year can lead to an increase in the proportion of roads that do not require repair. In the case of the Public Roads Authority's road network, most rehabilitations were planned between 2005 and 2010. During this period, the number of sections where rehabilitation was not required increased. Between 2011 and 2018, the number of sections repaired per year allowed to maintain the state of the infrastructure not requiring repair unchanged. After 2019, the number of rehabilitated streets has clearly decreased, so the proportion of sections that do not require repair has decreased. A graphic interpretation of this analysis is presented at Fig. 1.

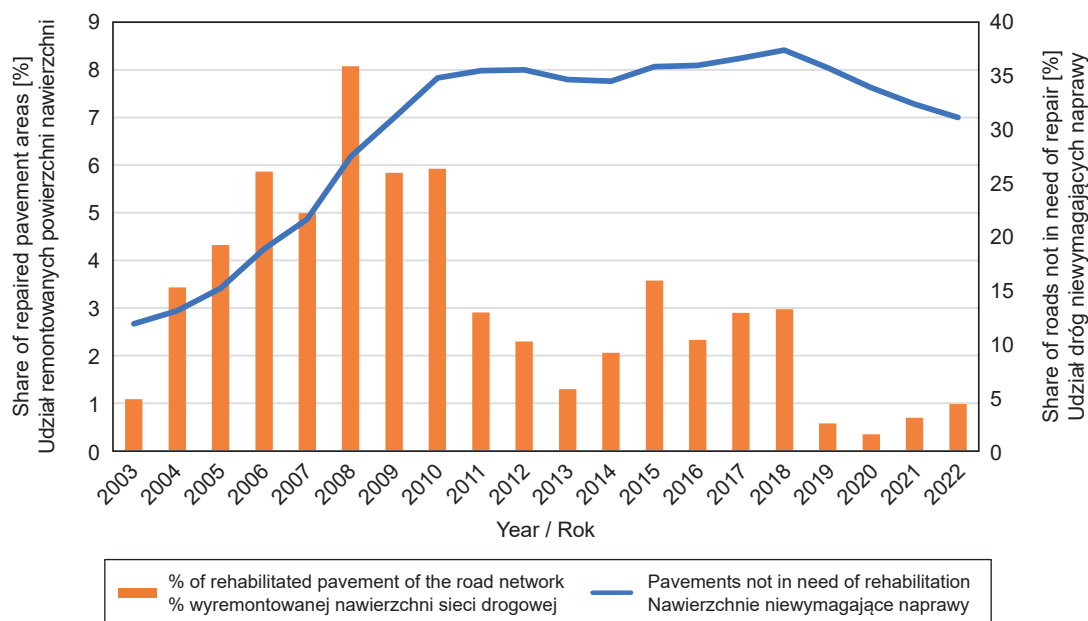


Fig. 1. Diagram of the dependence of the proportion of roads not in need of repair on the amount of road pavement repair by year; own analysis
Rys. 1. Wykres zależności udziału dróg niewymagających remontu od ilości remontowanych nawierzchni dróg w podziale na lata; analiza własna

Celem niniejszego artykułu była kontynuacja weryfikacji efektywności zrealizowanych remontów wybranych odcinków 11 ulic na podstawie parametrów kształtu czaszy ugięć, które są często stosowane w ocenie stanu konstrukcji [5]. Wnioski uzupełniono o analizę zmienności modułów sztywności warstw nawierzchni. Efektywność sprawdzano na wybranych odcinkach, na których opracowano technologię remontu oraz wykonano remont w 2016 r. Ocenę efektywności tych remontów przeprowadzono po 3 latach eksploatacji (tj. w 2019 r.) oraz po 6 latach (tj. w 2022 r.).

2. METODYKA OCENY WZMOCNIENIA

Metodyka oceny została szczegółowo opisana w artykule [4]. W niniejszej publikacji przytoczono najważniejsze informacje i założenia. Przy projektowaniu wzmocnienia nawierzchni ulic wykorzystano model obliczeniowy półprzestrzeni sprężystej wielowarstwowej. Dane materiałowe sztywności poszczególnych warstw z podziałem na pakiet warstw asfaltowych (jako całość), podbudowę oraz podłoże pochodziły z badań ugięciomierzem dynamicznym FWD i obliczeń odwrotnych przy użyciu oprogramowania Elmod. Pomiar modułów sztywności na każdym z ocenianych odcinków był wykonywany na każdym pasie ruchu co 25 m. Z uwagi na dużą zmienność modułów sztywności oraz lokalne występowanie niskich wartości, ostateczne wartości modułów sztywności poszczególnych warstw wykorzystanych w analizie mechanicznej dla danej ulicy przyjęto jako percentyl rzędu 0,05, co daje podejście bezpieczne i może być w przyszłości zweryfikowane.

Do analizy wytypowano 11 odcinków ulic zróżnicowanych pod względem kategorii ruchu, rodzaju podbudowy i grubości konstrukcji. Każda z remontowanych dróg została zaklasyfikowana do przebudowy z uwagi na zły stan wizualny lub wymagane wzmocnienie. Parametry techniczne (grubość warstw konstrukcyjnych oraz wyznaczone na podstawie badań rzeczywiste moduły sztywności warstw) oraz kategorię obciążenia ruchem przedstawiono w Tabl. 1.

Dla zobrazowania zmian parametrów kształtu czaszy ugięć przedstawiono analizę wyników badań ugięć FWD wykonanych w 2016 r. (przed remontem), w 2019 r. (czyli po 3 latach od remontu) oraz w 2022 r. (czyli po 6 latach od remontu).

The aim of this paper was to continue to verify the effectiveness of the completed repairs of selected sections of 11 streets based on deflection basin shape parameters which are often used in assessing the condition of structures [5]. The conclusions were supplemented by an analysis of the variability of the stiffness moduli of the pavement layers. Effectiveness was checked on selected sections where the rehabilitation technology was developed and the rehabilitation was carried out in 2016. The effectiveness of the rehabilitations was assessed after three years of operation (i.e. in 2019) and after six years (i.e. in 2022).

2. REINFORCEMENT ASSESSMENT METHODOLOGY

The assessment methodology is described in detail in the paper [4]. This publication cites key information and assumptions. The design of the road pavement reinforcement used a computational model of the multilayer elastic half-space. Material data for the stiffness of the individual layers with break-down into asphalt layer package (as a whole), subbase and substrate were derived from Falling Weight Deflectometer (FWD) tests and inverse calculations using Elmod software. The measurement of the stiffness moduli on each of the sections evaluated was carried out on each lane every 25 m. Due to the high variability of the stiffness moduli and the local occurrence of low values, the final values of the stiffness moduli of the individual layers used in the mechanistic analysis for a given street were taken as a percentile of 0.05, which provides a safe approach and can be verified in the future.

Eleven street sections were selected for analysis, varying in terms of traffic category, type of subbase and the structure thickness. Each of the repaired roads was classified for reconstruction due to poor visual condition or required reinforcement. The technical parameters (thickness of the structural layers and the actual stiffness moduli of the layers determined on the basis tests) and the traffic load category are shown in Table 1.

To illustrate the changes in the deflection basin shape parameters, an analysis of the results of the FWD deflection tests performed in 2016 (before the refurbishment) is presented, in 2019 (i.e. 3 years after rehabilitation) and in 2022 (i.e. 6 years after rehabilitation).

Table 1. Street sections in the capital city of Warsaw selected for evaluation of the pavement condition
Tablica 1. Odcinki ulic na terenie m.st. Warszawy wybrane do oceny stanu nawierzchni

Street Ulica	Section of road Odcinek drogi	Stiffness moduli based on FWD tests expressed (percentile of 0.05) Moduły sztywności na podstawie badań FWD (percentyl rzędu 0,05)				Thickness of pavement layers ^{*)} Grubość warstw nawierzchni ^{*)}	
		Year Rok	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	D1 [cm]	D2 [cm]
al. Niepodległości	Wiktorska – al. Wilanowska	2019	6891	1182	98	11.2	21
		2022	5591	3280	116		
Cyrylików	Chruściela – Okuniewska (granica miasta / city boundary)	2019	6809	201	87	14.6	20
		2022	4469	276	100		
Gołkowska	Czerniakowska – Statkowskiego	2019	12523	229	40	11.7	20
		2022	4828	180	60		
Grzybowa	Instruktorska – Komandosów	2019	4435	365	92	10.3	25
		2022	10859	444	111		
Kinowa	al. Waszyngtona – al. Stanów Zjednoczonych	2019	4990	396	161	25.2	15
		2022	3982	202	106		
Kraśińskiego	pl. Wilsona – Wybrzeże Gdyńskie	2019	6302	209	44	11.5	18
		2022	1707	141	51		
Lektykarska	Podleśna – Gdańska	2019	3515	201	68	13.7	20
		2022	4319	157	74		
Nowoursynowska	Wałbrzyska – Dolina Służewiecka	2019	7335	279	38	9.6	25
		2022	5314	753	42		
Okuniewska	Cyrylików – 1. Praskiego Pułku + 400 m	2019	8145	256	60	13.8	26
		2022	6601	332	78		
Rembielińska	Matki Teresy z Kalkuty – Toruńska (S8)	2019	3419	248	54	14.3	17
		2022	5222	109	65		
Strażacka	Chełmżyńska – Zesłańców Polskich	2019	7096	489	74	14.8	22
		2022	6548	197	86		

^{*)} actual layer thickness based on inspection boreholes after rehabilitation
rzeczywista grubość warstw na podstawie odwiertów kontrolnych po remoncie

Na podstawie badań wyznaczono charakterystyki kształtu czaszy ugięć, które informują o stanie górnych warstw nawierzchni (*SCI300*, A_{UPP} , *RoC*), podbudowy (*BDI600*) lub podłoża (*BDI900*) [6]. W przypadku obliczeń metodą mechanistyczną zastosowano metodologię opisaną w Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [7], poradniku analizy i projektowania konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych pod redakcją prof. Judyckiego [8] oraz Katalogu Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [9].

Analizę wskaźników kształtu czaszy ugięć oraz trwałości metodą mechanistyczną poprzedzono analizą stanu

Based on the tests, the deflection basin shape characteristics were determined, which provides information on the condition of the upper layers of the pavement (*SCI300*, A_{UPP} , *RoC*), the subbase (*BDI600*) or the substrate (*BDI900*) [6]. In the case of calculations using the mechanistic method, the methodology described in the Catalogue of Typical Structures of Flexible and Semi-Rigid Pavements [7], the handbook of analysis and design of structures of flexible and semi-rigid pavements, edited by Professor Judycki [8] and the Catalogue of Reconstructions and Rehabilitations of Flexible and Semi-Rigid Pavements [9] was used.

nawierzchni ocenianych ulic. Dane do analizy zebrano podczas pieszej inwentaryzacji ocenianych odcinków. Inwentaryzację przeprowadzono w 2019 r. oraz 2022 r. Zgromadzone dane obejmowały indeks spękań, spękania podłużne, spękania siatkowe i skupiska rys, koleiny, łaty, obniżone studzienki oraz wyboje.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W celu zobrazowania zmiany stanu nawierzchni przed zabiegami remontowymi na Rys. 2 zaprezentowano skumulowaną ilość zinwentaryzowanych uszkodzeń na 11 ocenianych odcinkach na przykładzie spękań poprzecznych (szt.) oraz spękań siatkowych (m^2) zinwentaryzowanych przed remontem, po remoncie, po 3 latach eksploatacji oraz po 6 latach eksploatacji. W przypadku spękań poprzecznych stwierdzono, że z 1138 zdiagnozowanych spękań poprzecznych całkowitych przed remontem, odtworzeniu uległo 1 spękanie po 3 latach eksploatacji ($< 0,1\%$) oraz 6 szt. po 6 latach eksploatacji (ok. $0,5\%$). Na podstawie uzyskanych danych stwierdzono średnią szybkość odtwarzania się spękań poprzecznych podczas eksploatacji od $0,33$ szt./rok (ok. $0,3\%$) do $1,00$ szt./rok ($0,9\%$). W przypadku spękań siatkowych odtworzeniu uległo $45 m^2$ spękań (ok. $0,8\%$) po 3 latach eksploatacji oraz $102,5 m^2$ spękań (ok. 2%) po 6 latach eksploatacji. Obliczona szybkość przyrostu wynosiła od $15 m^2/rok$ do $17 m^2/rok$ eksploatacji (ok. $0,3-0,4\%$ na rok eksploatacji).

The analysis of deflection basin shape indices and durability using the mechanistic method was preceded by an analysis of the pavement condition of the streets under assessment. Data for the analysis was collected during a walking inventory of the sections subject to evaluation. The inventory was carried out in 2019 and 2022. Data collected included crack index, longitudinal cracks, mesh cracks and crack clusters, ruts, patches, lowered manholes and potholes.

3. TEST RESULTS AND ANALYSIS

In order to illustrate the change in pavement condition prior to rehabilitation procedures, Fig. 2 presents the cumulative amount of inventoried damage on the 11 evaluated sections using the example of transverse cracks (pcs) and mesh cracks (m^2) inventoried before rehabilitation, after rehabilitation, after 3 years of operation and after 6 years of operation. For transverse cracks, it was found that out of the 1138 diagnosed total transverse cracks before rehabilitation, 1 crack was restored after 3 years of operation ($< 0.1\%$) and 6 cracks after 6 years of operation (approximately 0.5%). Based on the data obtained, the average rate of transverse crack restoration during operation ranged from 0.33 pcs./year (approx. 0.3%) to 1.00 pcs/year (0.9%). In the case of mesh cracks, $45 m^2$ of cracks (approx. 0.8%) were restored after 3 years of operation and $102.5 m^2$ of cracks (approx. 2%) after 6 years of operation. The calculated growth rate was between $15 m^2/year$ and $17 m^2/year$ of operation (approx. $0.3-0.4\%$ per year of operation).

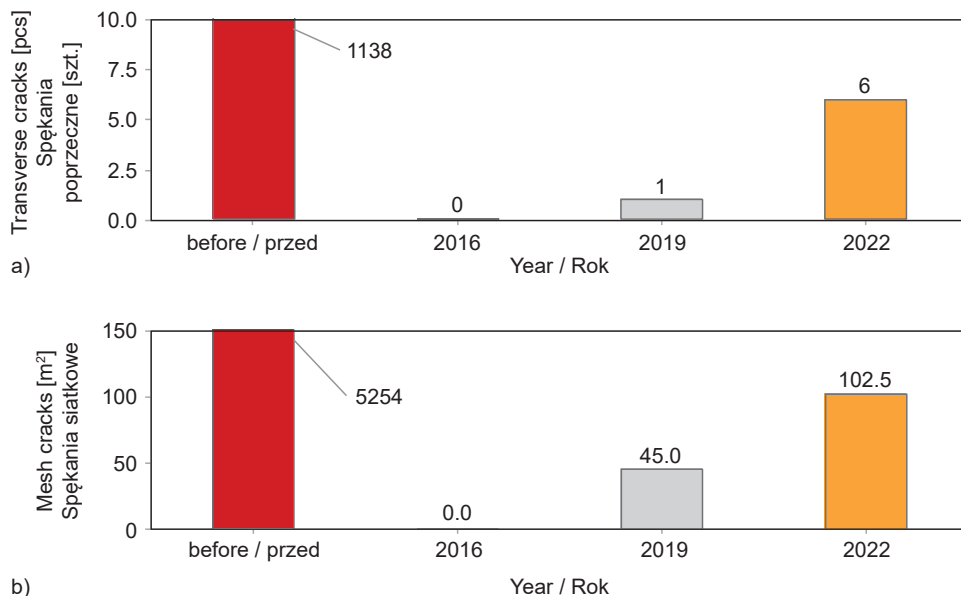


Fig. 2. Cumulative quantitative change in transverse (a) and mesh cracks (b) on the 11 sections in question before rehabilitation, after rehabilitation and after 3 and 6 years of operation
Rys. 2. Skumulowana zmiana ilościowa spękań poprzecznych (a) oraz siatkowych (b) na 11 przedmiotowych odcinkach przed remontem, po remoncie oraz po 3 i 6 latach eksploatacji

Na podstawie badań ugięciomierzem FWD przeanalizowano ugięcia znormalizowane przed remontem (2016 r.), 3 lata po remoncie (2019 r.) oraz 6 lat po remoncie (2022 r.), dające pogląd o stanie konstrukcji nawierzchni, oraz promień czaszy ugięć, pokazujący stan górnych warstw oraz podbudowy (Rys. 3, Tabl. 2). Na rysunku zaprezentowano obliczone przedziały ufności wartości średniej przy poziomie ufności 95%. Do obliczenia przedziałów ufności wykorzystano indywidualne odchylenia standardowe. Po 3 latach eksploatacji po remoncie nastąpiło zmniejszenie średniej wartości ugięć znormalizowanych nawierzchni o ok. 36%, a w 2022 roku o 45% względem stanu sprzed remontu. Po 3 latach eksploatacji nastąpiło zwiększenie średniej wartości promienia czaszy ugięć o 19%, a po 6 latach różnica zmniejszyła się do 5%. Średnie pole powierzchni pod czaszą ugięć po remoncie zmniejszyło się o 57%, a po 6 latach o 62% (różnice istotne statystycznie, poparte testem t-studenta, z wyjątkiem średniej wartości promienia czaszy ugięć po 6 latach). Przy ocenie tych parametrów w kontekście typu konstrukcji można zauważyć, że zaobserwowano większy wpływ remontu na poprawę stanu konstrukcji nawierzchni w przypadku konstrukcji podatnych (podbudowa niezwiązana lub brukowcowa) niż w przypadku konstrukcji półsztywnych (podbudowa z betonu lub chudego betonu). Średnie ugięcia znormalizowane $D_{0,norm}$ w grupie konstrukcji podatnych po 3 latach od remontu były niższe o 52%, a po 6 latach o 58%. W grupie konstrukcji półsztywnych – tylko o 5% po 3 latach lub o 23% po 6 latach eksploatacji. W przypadku średniego promienia czaszy ugięć RoC na odcinkach o konstrukcji podatnej wartość parametru wzrosła o 117% po 3 latach eksploatacji oraz o 115% po 6 latach eksploatacji. W przypadku konstrukcji półsztywnej promień zmniejszył się o 1% po 3 latach oraz zmniejszył się o 18% po 6 latach. Wykazano również, że średnie pole powierzchni pod czaszą ugięć A_{upp} na odcinkach o konstrukcji podatnej po 3 latach eksploatacji zmalało o 70%, podobnie jak po 6 latach (70%). Natomiast na odcinkach o konstrukcji półsztywnej pole zmalało po 3 latach o 24%, a po 6 latach o 39%.

Podsumowując analizę parametrów $D_{0,norm}$ można stwierdzić, że pozytywny wpływ zabiegu remontowego był najlepiej widoczny na odcinkach o konstrukcji podatnej. Mniejszy wpływ zaobserwowano na odcinkach o konstrukcji półsztywnej. Zaobserwowano również, że wraz z czasem eksploatacji obniżają się ugięcia średnie, co

Based on the FWD tests, normalised deflections were analysed before rehabilitation (2016), 3 years after rehabilitation (2019) and 6 years after rehabilitation (2022), giving an idea of the condition of the pavement structure, and the radius of the deflection basin, showing the condition of the upper layers and subbase (Fig. 3, Table 2). The figure presents the calculated confidence intervals of the mean value at a confidence level of 95%. Individual standard deviations were used to calculate confidence intervals. After 3 years of operation following the rehabilitation, there has been a reduction in the mean value of normalised deflections of the pavement of approximately 36% and in 2022 of 45% relative to the pre-rehabilitation condition. After 3 years of operation, there was a 19% increase in the mean value of the deflection basin radius, and after 6 years the difference decreased to 5%. The average area under the deflection basin decreased by 57% after rehabilitation and by 62% after 6 years (statistically significant differences, supported by the Student's t-test, except for the mean value of the deflection basin radius after 6 years). When assessing these parameters in the context of the type of structure, it can be noted that a greater effect of rehabilitation on the improvement of the pavement structure was observed for flexible structures (unbound or paving stone subbase) than for semi-rigid structures (concrete or lean concrete subbase). The average normalised deflections $D_{0,norm}$ in the group of flexible structures were 52% lower after 3 years of rehabilitation and 58% lower after 6 years. In the group of semi-rigid structures – by only 5% after 3 years or by 23% after 6 years of operation. In the case of the average radius of the RoC deflection basin on sections with a flexible structure, the value of the parameter increased by 117% after 3 years of operation and by 115% after 6 years of operation. For the semi-rigid structure, the radius decreased by 1% after 3 years and decreased by 18% after 6 years. It was also shown that the average area under the A_{upp} deflection basin on sections with a flexible structure decreased by 70% after 3 years of operation, as it did after 6 years (70%). In contrast, on sections with semi-rigid structure, the area decreased by 24% after 3 years and by 39% after 6 years.

Summarising the analysis of the $D_{0,norm}$ parameters, it can be concluded that the positive impact of the rehabilitation procedure was most evident on sections with a flexible structure. A smaller impact was observed on sections with semi-rigid structure. It was also observed that the average

może wynikać z zaistniałego zjawiska stopniowej aktywacji siatki zbrojącej nawierzchnię, zauważonego także na innych odcinkach badawczych [10]. W przypadku promienia czaszy ugięć RoC na nawierzchniach o konstrukcji podatnej uzyskano poprawę tego parametru po pierwszym 3-letnim okresie oceny, natomiast po drugim okresie oceny stwierdzono dalsze różnice na poziomie 10%. W przypadku nawierzchni o konstrukcji półsztywnej parametr ten zmalał (pogorszył się) najbardziej na nawierzchni o podbudowie z betonu, a w przypadku podbudowy z chudego betonu wzrósł po 3 latach i utrzymywał się na podobnym poziomie po 6 latach. Parametr A_{UPP} , czyli powierzchni pod czaszą ugięć, po 3 latach eksploatacji uległ największej poprawie w przypadku nawierzchni o konstrukcji podatnej, szczególnie brukowcowej, a po kolejnych 3 latach utrzymywał się na podobnym poziomie (podbudowa betonowa) lub poprawił się.

deflections decrease with time in operation, which may be due to the observed phenomenon of gradual activation of the pavement reinforcement mesh, as has been observed in other test sections [10]. In the case of the RoC deflection basin radius on flexible pavements, an improvement in this parameter was obtained after the first 3-year evaluation period, while further differences of 10% were found after the second evaluation period. For pavements with semi-rigid structure, this parameter decreased (deteriorated) most on pavements with a concrete subbase, while it increased on the lean concrete subbase after 3 years and remained at a similar level after 6 years. The A_{UPP} parameter, i.e. the area under the deflection basin, improved the most after 3 years of operation for pavements with a flexible structure, particularly paving stone, and remained at a similar level (concrete subbase) or improved after further 3 years.

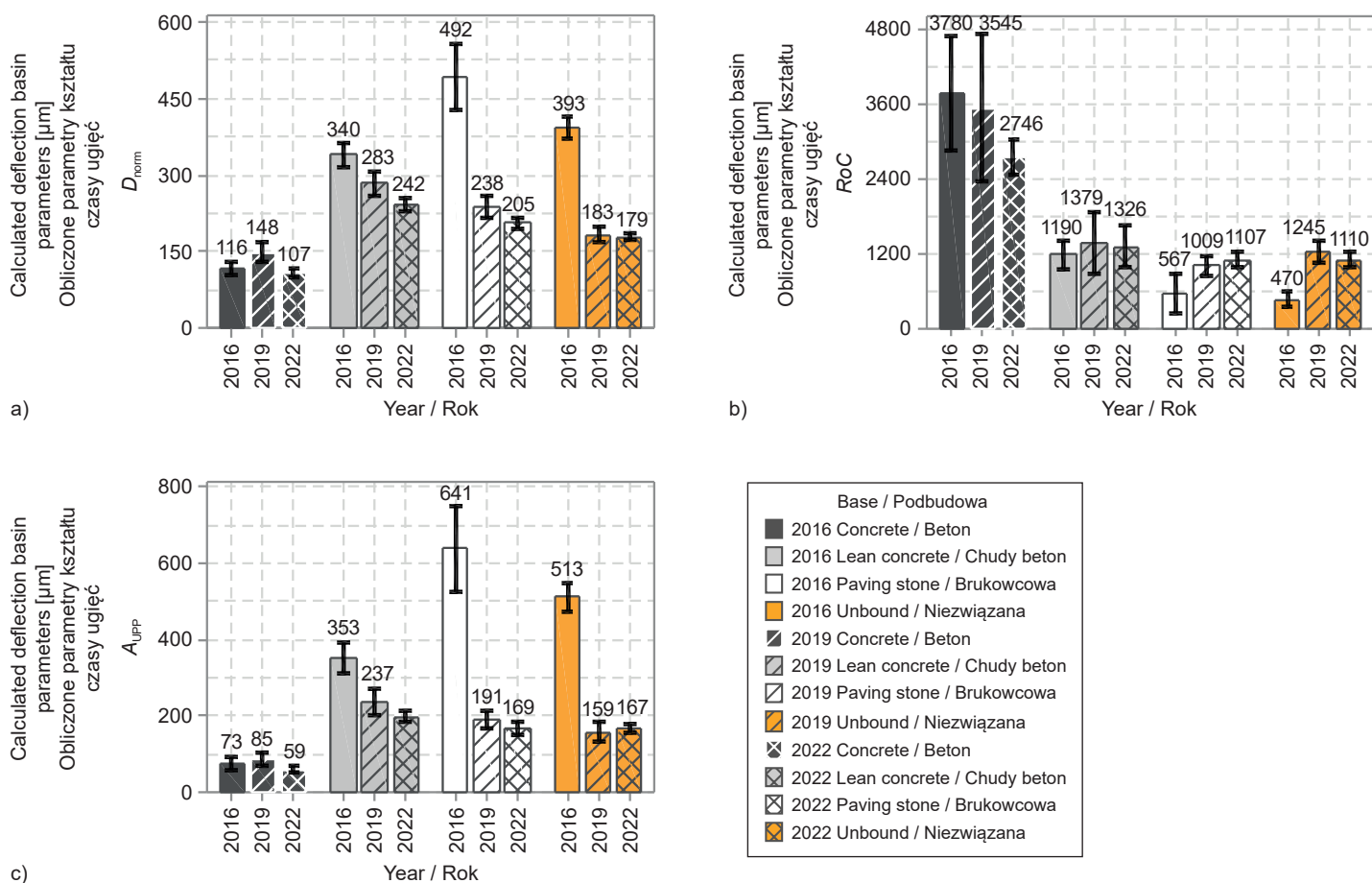


Fig. 3. Results of D_{norm} (a) deflection tests and calculations of RoC (b) and A_{UPP} (c) deflection basin shape parameters
Rys. 3. Wyniki badań ugięć D_{norm} (a) i obliczeń parametrów kształtu czaszy ugięć RoC (b) i A_{UPP} (c)

Table 2. Summary and analysis of deflection test results and calculations of *RoC* and *A_{UPP}* deflection basin shape parameters
Tablica 2. Zestawienie i analiza wyników badań ugięć i obliczeń parametrów kształtu czaszy ugięć *RoC* i *A_{UPP}*

	Type of subbase Rodzaj podbudowy	Concrete Betonowa	Lean concrete Chudy beton	Unbound Niezwiązana	Paving stone Brukowcowa
	Structure type Typ konstrukcji	Semi-rigid Półsztywna	Semi-rigid Półsztywna	Flexible Podatna	Flexible Podatna
Year / Rok	Parameter / Parametr	Mean values / Średnie wartości [µm]			
2016	D_{norm}	116	340	492	393
	RoC	3780	1190	567	470
	A_{UPP}	73	353	641	513
2019	D_{norm}	148	283	238	183
	RoC	3545	1379	1009	1245
	A_{UPP}	85	237	191	159
2022	D_{norm}	107	242	205	179
	RoC	2746	1326	1107	1110
	A_{UPP}	59	200	169	167
Analysis of change Analiza zmian	Parameter / Parametr	Comparison 2016-2019 / Porównanie 2016-2019			
Due to the type of subbase Z uwagi na rodzaj podbudowy	D_{norm}	28% (0.006)	−17% (0.001)	−52% (0.001)	−53% (0.001)
	RoC	−6% (0.754) ^{*)}	16% (0.482) ^{*)}	78% (0.001)	165% (0.010)
	A_{UPP}	16% (0.334) ^{*)}	−33% (0.001)	−70% (0.001)	−69% (0.001)
Due to the type of structure Z uwagi na typ konstrukcji	D_{norm}	−5% (0.044)		−52% (0.001)	
	RoC	−1% (0.806) ^{*)}		117% (0.001)	
	A_{UPP}	−24% (0.001)		−70% (0.001)	
Globally Globalnie	D_{norm}	−36% (0.001)			
	RoC	19% (0.040)			
	A_{UPP}	−57% (0.000)			
Analysis of change Analiza zmian	Parameter / Parametr	Comparison 2016-2022 / Porównanie 2016-2022			
Due to the type of subbase Z uwagi na rodzaj podbudowy	D_{norm}	−8% (0.292) ^{*)}	−29% (0.001)	−58% (0.001)	−54% (0.001)
	RoC	−27% (0.033)	11% (0.495) ^{*)}	95% (0.001)	136% (0.002)
	A_{UPP}	−19% (0.159) ^{*)}	−43% (0.001)	−74% (0.001)	−67% (0.001)
Due to the type of structure Z uwagi na typ konstrukcji	D_{norm}	−23% (0.001)		−57% (0.001)	
	RoC	−18% (0.335) ^{*)}		114% (0.001)	
	A_{UPP}	−39% (0.001)		−71% (0.001)	
Globally Globalnie	D_{norm}	−45% (0.001)			
	RoC	5% (0.201) ^{*)}			
	A_{UPP}	−62% (0.001)			

^{*)} Statistically insignificant / Nieistotne statystycznie

Values in parentheses represent the P-statistic for the Student’s t-test of the difference of two means; a P-value less than 0.05 confirms statistical significance.
Wartości w nawiasach przedstawiają statystyki P dla testu t-Studenta różnicy dwóch średnich; wartość P mniejsza niż 0,05 potwierdza istotność statystyczną.

Następnie wyznaczono wybrane parametry geometrii cza-
szy ugięć (*SCI300*, *BDI600*, *BCI900*). Pomiary wykazały
istotny wpływ zabiegu remontowego na wielkość para-

Selected deflection basin geometry parameters (*SCI300*,
BDI600, *BCI900*) were then determined. The measure-
ments showed a significant effect of the rehabilitation

metrów kształtu czaszy ugięć górnych, średnich i dolnych warstw konstrukcyjnych w porównaniu do stanu przed remontem. Największy wzrost trwałości stwierdzono w obrębie górnych warstw (średni wskaźnik *SCI300* wyższy o 63% po 3 latach i o 67% po 6 latach od remontu), następnie w przypadku środkowych warstw (średni wskaźnik *BDI600* wyższy o 51% po 3 latach i o 57% po 6 latach), a najmniejszy wpływ w przypadku dolnych warstw (średni wskaźnik *BCI900* niższy o 34% po 3 latach i o 44% po 6 latach). Dzieląc oceniane odcinki pod względem typu konstrukcji zauważono, że w przypadku grupy nawierzchni o konstrukcji podatnej (o podbudowie np. z mieszanki mineralno-asfaltowej, kruszywa niezwiązane, bruku) uzyskano zdecydowanie większą poprawę parametrów kształtu czaszy ugięć w porównaniu do grupy nawierzchni półsztywnych (o podbudowie np. z betonu lub chudego betonu). Średnia wartość *SCI300* w przypadku konstrukcji podatnych była niższa o 74% po 3 latach i o 75% po 6 latach, zaś w przypadku konstrukcji sztywnych – niższa o 31% po 3 latach i o 45% po 6 latach. Średnia wartość parametru *BDI600* w przypadku konstrukcji podatnych była niższa o 65% po 3 latach i o 67% po 6 latach od remontu. W przypadku konstrukcji sztywnych wskaźnik ten był niższy o 15% po 3 latach i 27% po 6 latach od zabiegu remontowego. Nawierzchnie o konstrukcji podatnej uzyskały wartość parametru *BCI900* niższą o 48% po 3 latach i o 53% po 6 latach od remontu. W przypadku konstrukcji sztywnych wartość parametru była niższa zaledwie o 6% w 3 roku eksploatacji i o 26% w 6 roku eksploatacji. Większość stwierdzeń uzyskała poparcie statystyczne. Wyniki tej analizy ilustruje Tabl. 3 i Rys. 4.

Zaobserwowane wyniki wskazują, że zabieg remontowy znacząco wpłynął na poprawę parametrów kształtu czaszy ugięć w nawierzchniach podatnych. Odnotowano spadek znormalizowanych ugięć o ponad połowę z poziomu 400-500 μm do poziomu 180-250 μm , co świadczy o istotnym wzroście nośności analizowanych konstrukcji. Promień czaszy ugięć zwiększył się ponad dwukrotnie, co sugeruje, że dzięki zastosowaniu zbrojenia geosyntetycznego z siatki szklanej większy obszar nawierzchni współpracuje z konstrukcją, zwłaszcza w późniejszych fazach eksploatacji, kiedy odnotowano dalszą poprawę parametrów. Te obserwacje potwierdzono również na długoterminowym odcinku badawczym [10]. Istotne polepszenie para-

procedure on the magnitude of the basin shape parameters of the deflections of the upper, middle and lower structural layers compared to the pre-rehabilitation condition. The greatest increase in durability was found within the upper layers (the average *SCI300* index 63% higher after 3 years and 67% higher after 6 years of rehabilitation), followed by the middle layers (the average *BDI600* index 51% higher after 3 years and 57% higher after 6 years), and the least impact for the lower layers (the average *BCI900* index 34% lower after 3 years and 44% lower after 6 years). By dividing the sections evaluated in terms of structure type, it was noted that the group of pavements with flexible structure (with a subbase of e.g. mineral and asphalt mixture, unbound aggregate, paving stone) showed a significantly greater improvement in the deflection basin shape parameters compared to the group of semi-rigid pavements (with a subbase of e.g. concrete or lean concrete). The average *SCI300* value for flexible structures was 74% lower after 3 years and 75% lower after 6 years, while for rigid structures it was 31% lower after 3 years and 45% lower after 6 years. The average value of the *BDI600* parameter for flexible structures was 65% lower after 3 years and 67% lower after 6 years of rehabilitation. In the case of rigid structures, the index was 15% lower after 3 years and 27% after 6 years following the rehabilitation procedure. Pavements with a flexible structure achieved the *BCI900* value 48% lower at 3 years and 53% lower at 6 years after rehabilitation. In the case of rigid structures, the value of the parameter was only 6% lower in the third year of operation and 26% lower in the sixth year of operation. Most of the statements were supported by statistics. The results of this analysis are illustrated by Table 3 and Fig. 4.

The observed results indicate that the rehabilitation procedure has significantly improved the deflection basin shape parameters of the flexible pavements. There has been a decrease in normalised deflections by more than half from 400-500 μm to a level of 180-250 μm , indicating a significant increase in the load-bearing capacity of the structures analysed. The radius of the deflection basin more than doubled, suggesting that with the glass grid geosynthetic reinforcement, a larger area of the pavement works with the structure, especially in the subsequent phases of operation when further performance improvements were noted. These observations were also confirmed in a long-term study episode [10]. Significant im-

metrów czaszy ugięć zaobserwowano w górnych, środkowych i dolnych warstwach konstrukcji.

provements in deflection basin parameters were observed in the upper, middle and lower layers of the structure.

Table 3. Summary and analysis of results of calculations of the *SCI300*, *BDI600* and *BCI900* deflection basin shape parameters
Tablica 3. Zestawienie i analiza wyników obliczeń parametrów kształtu czaszy ugięć *SCI300*, *BDI600* i *BCI900*

	Type of subbase Rodzaj podbudowy	Concrete Betonowa	Lean concrete Chudy beton	Unbound Niezwiazana	Paving stone Brukowcowa
	Structure type Typ konstrukcji	Semi-rigid Półsztywna	Semi-rigid Półsztywna	Flexible Podatna	Flexible Podatna
Year / Rok	Parameter / Parametr	Mean values / Średnie wartości [μm]			
2016	SCI300	18	84	159	128
	BDI600	14	77	138	109
	BCI900	14	52	73	60
2019	SCI300	19	51	39	35
	BDI600	19	58	49	38
	BCI900	18	44	39	30
2022	SCI300	14	42	36	37
	BDI600	12	50	42	40
	BCI900	11	38	33	29
Analysis of change Analiza zmian	Parameter / Parametr	Comparison 2016-2019 / Porównanie 2016-2019			
Due to thetype of subbase Z uwagi na rodzaj podbudowy	SCI300	6% (0.760)*)	–39% (0.001)	–75% (0.001)	–73% (0.001)
	BDI600	36% (0.034)	–25% (0.001)	–64% (0.001)	–65% (0.001)
	BCI900	29% (0.050)	–15% (0.007)	–47% (0.001)	–50% (0.001)
Due to the type of structure Z uwagi na typ konstrukcji	SCI300	–31% (0.001)		–74% (0.001)	
	BDI600	–15% (0.006)		–65% (0.001)	
	BCI900	–6% (0.068)*)		–48% (0.001)	
Globally Globalnie	SCI300	–63% (0.001)			
	BDI600	–51% (0.001)			
	BCI900	–34% (0.001)			
Analysis of change Analiza zmian	Parameter / Parametr	Comparison 2016-2022 / Porównanie 2016-2022			
Due to the type of subbase Z uwagi na rodzaj podbudowy	SCI300	–22% (0.172)*)	–50% (0.001)	–77% (0.001)	–71% (0.001)
	BDI600	–14% (0.392)*)	–35% (0.001)	–70% (0.001)	–63% (0.001)
	BCI900	–21% (0.019)	–27% (0.001)	–55% (0.001)	–52% (0.001)
Due to the type of structure Z uwagi na typ konstrukcji	SCI300	–45% (0.001)		–75% (0.001)	
	BDI600	–32% (0.001)		–67% (0.001)	
	BCI900	–26% (0.001)		–53% (0.001)	
Globally Globalnie	SCI300	–67% (0.001)			
	BDI600	–57% (0.001)			
	BCI900	–44% (0.001)			

^{*)} Statistically insignificant (the null hypothesis could not be rejected) / Nieistotne statystycznie (nie można było odrzucić hipotezy zerowej)
Values in parentheses represent the significance result of the Student's t-test for the difference of two independent sample means;
significance less than 0.05 allows the rejection of the null hypothesis of equality of means.
Wartości w nawiasach przedstawiają wynik istotności testu t-Studenta dla różnicy dwóch średnich prób niezależnych;
istotność mniejsza niż 0,05 pozwala odrzucić hipotezę zerową o równości średnich.

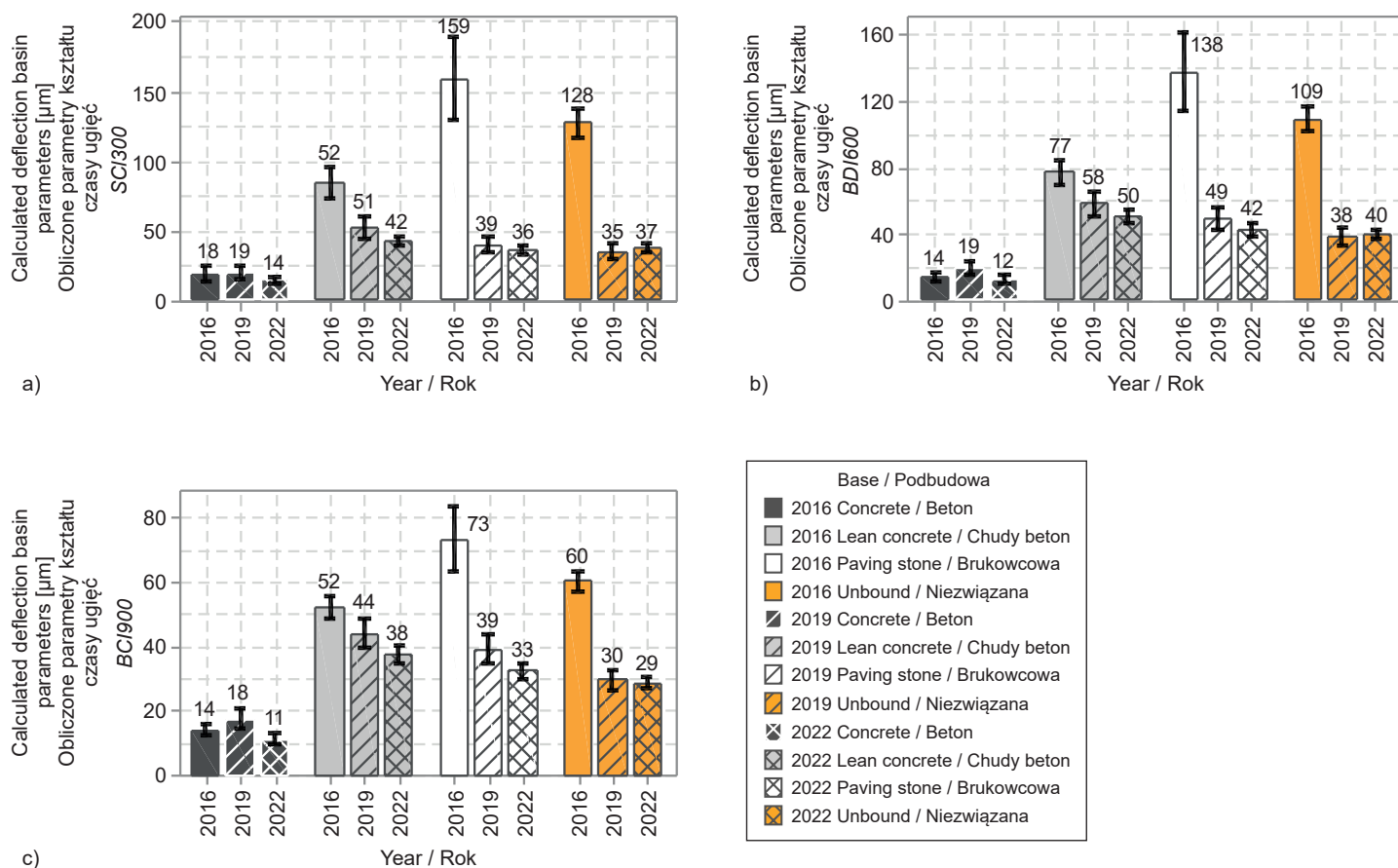


Fig. 4. Results of calculations of the *SCI/300* (a), *BDI/600* (b) and *BC/900* (c) deflection basin shape parameters
Rys. 4. Wyniki obliczeń parametrów kształtu czaszy ugięć *SCI/300* (a), *BDI/600* (b) i *BC/900* (c)

W przypadku konstrukcji półsztywnych (z podbudową z betonu lub chudego betonu), wpływ naprawy nie był tak wyraźny jak w konstrukcjach podatnych, a niekiedy nawet dochodziło do pogorszenia wskaźników stanu. Analiza szczegółowa wykazała, że w nawierzchniach z podbudową betonową technologia naprawy nie przyniosła korzystnych rezultatów, podczas gdy w nawierzchniach z chudym betonem zauważono wyraźną poprawę wskaźników czaszy ugięć. Może to wynikać z gorszego stanu podbudów z chudego betonu, które charakteryzowały się licznymi spękaniem i degradacją strukturalną (uszkodzenia mrozowe, wietrzenie). Sugeruje to, że nawierzchnie te zachowywały się bardziej jak konstrukcje podatne.

In the case of semi-rigid structures (with a concrete or lean concrete subbase), the impact of the repair was not as pronounced as in flexible structures, and sometimes there was even a deterioration in condition indices. The detailed analysis showed that in pavements with concrete subbase, the rehabilitation technology did not produce favourable results, while in pavements with lean concrete, a clear improvement in the deflection basin indices was noted. This may be due to the inferior condition of the lean concrete subbase, which was characterised by numerous cracks and structural degradation (frost damage, weathering). This suggests that the pavements behaved more like flexible structures.

Dodatkowo stwierdzono, że nawierzchnie półsztywne charakteryzowały się znacznie mniejszymi ugięciami przed remontem niż konstrukcje o podbudowie podatnej, a sam remont nie przyniósł tak wyraźnej poprawy parametrów. Niemniej jednak, wskaźniki te pozostawały na bardzo dobrym poziomie zarówno przed, jak i po zabiegu remontowym. Remont przyniósł wymierne korzyści objawiające się poprawą stanu użytkowego nawierzchni, który również składa się na ocenę ogólną stanu nawierzchni.

Zastosowanie wzmacniającej siatki szklanej [10] lub stalowej [11] było przedmiotem odrębnych analiz, które wykazały zwiększoną trwałość konstrukcji zbrojonej w porównaniu do niezbrojonej.

Ostatnim etapem było wyznaczenie pozostałej trwałości konstrukcji omawianych nawierzchni przy użyciu metody mechanistycznej. Do obliczeń wykorzystano rzeczywiste grubości warstwy konstrukcyjnych nawierzchni, dane materiałowe z badań kontrolnych oraz pomiary odwrotne przeprowadzone metodą FWD. Z założenia minimalna trwałość remontu miała wynosić co najmniej 8 lat. W celu weryfikacji spełnienia tego założenia przeprowadzono obliczenia po 6 latach eksploatacji. Aby spełnić wymagane kryterium, obliczenia powinny wykazać pozostałą trwałość wystarczającą na minimum 2 lata. W przypadku obliczeń, do których wykorzystano wartości średnie modułów sztywności warstw stwierdzono, że wszystkie 11 ocenianych odcinków charakteryzowało się wystarczającą trwałością zmęczeniową. W przypadku oceny opartej na percentylu 0,05 wartości modułów sztywności, pozostałą trwałość na poziomie co najmniej 2 lat uzyskano w przypadku 8 z 11 ocenianych ulic. W przypadku ulic, które nie spełniły tego wymagania stwierdzono, że lokalne wartości modułów stanowiące mniej niż 5% wszystkich wyników były niższe niż zakładane. Jest to zapewne konsekwencją dużego zróżnicowania stanu wyeksploatowanej podbudowy i podłoża na ulicznej sieci drogowej, często poddawanej lokalnym przebudowom i innym ingerencjom podczas zabiegów utrzymaniowych w obrębie instalacji podziemnych. Ponadto wskaźnik ogólnego stanu nawierzchni może być nadal na odpowiednim poziomie za sprawą dobrego wyniku oceny wskaźnika stanu użytkowego nawierzchni. Wyniki analizy modułów sztywności przedstawia Tabl. 4.

In addition, it was found that semi-rigid pavements had significantly less deflection before rehabilitation than structures with flexible subbase, and the rehabilitation itself did not result in such an explicit improvement in performance. Nevertheless, these indices remained at a very good level both before and after the rehabilitation procedure. The rehabilitation has brought tangible benefits manifested in the improvement of the usable condition of the pavement, which also contributes to the overall pavement condition evaluation.

The use of reinforcing glass grid [10] or steel mesh [11] has been the subject of separate analyses which have shown increased durability of reinforced structure compared to non-reinforced one.

The final stage was to determine the remaining structural life of the pavements in question using a mechanistic method. Actual pavement structure layer thickness values, material data from control tests and inverse measurements carried out using the FWD method were used in the calculations. It was intended that the minimum lifespan of the rehabilitation would be at least eight years. To verify that this assumption was met, calculations were carried out after 6 years of operation. To meet the required criterion, the calculations should show a residual life of at least 2 years. For the calculations for which the mean values of the stiffness moduli of the layers were used, it was found that all 11 sections under evaluation had sufficient fatigue life. In case of assessment based on a percentile of 0.05 stiffness modulus values, a residual life of at least 2 years was achieved for 8 of the 11 streets assessed. For the streets that did not meet this requirement, local modulus values representing less than 5% of the total results were found to be lower than expected. This is probably a consequence of the wide variation in the condition of the depleted subbase and substrate on the street road network, which is often subjected to local reconstruction and other interference during maintenance operations on underground utilities. In addition, the overall pavement condition index may still be at an appropriate level due to the good result of the pavement service condition index assessment. The results of the stiffness modulus analysis are presented at Table 4.

Table 4. Results of the calculation of the remaining life of the pavement structure
Tablica 4. Wyniki obliczeń pozostałej trwałości konstrukcji nawierzchni

Street Ulica	Horizontal strains in the underside of bitumen layers [µm] Odształcenia poziome w spodzie warstw asfaltowych	Vertical strains on top of the subbase [µm] Odształcenia pionowe na wierzchu podbudowy	Remaining life [millions of design axles] Pozostała trwałość [mln osi oblicz.]	Remaining min. 2-year load-bearing capacity after 6 years Pozostała min. 2-letnia nośność po 6 latach	Remaining load- bearing capacity after 6 years exceeding 2 years Pozostała nośność po 6 latach przekraczająca 2 lata
	A percentile of 0.05 of the modulus values was adopted Przyjęto percentyl 0,05 wartości modułów				Mean values Moduły średnie
al. Niepodległości	34	287	10.4	yes / tak	yes / tak
Cyrulików	217	549	0.6	yes / tak	yes / tak
Gołkowska	324	978	0.1	yes / tak	yes / tak
Grzybowa	158	481	1.1	yes / tak	yes / tak
Kinowa	131	318	6.5	yes / tak	yes / tak
Kraśńskiego	617	1652	0.1	no / nie	yes / tak
Lektykarska	290	729	0.2	yes / tak	yes / tak
Nowoursynowska	161	706	0.2	no / nie	yes / tak
Okuniewska	174	480	1.1	yes / tak	yes / tak
Rembielińska	282	766	0.2	yes / tak	yes / tak
Strażacka	188	485	1.0	yes / tak	yes / tak

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Po 3. i po 6. roku eksploatacji wystąpiły pierwsze oznaki odtwarzania się uszkodzeń, przy czym odtworzenie spękań siatkowych osiągnęło szybkość ok. 0,3-0,4%/rok eksploatacji, zaś spękań poprzecznych 0,3-0,9%/rok.
2. Na podstawie analizy parametrów geometrycznych czaszy ugięć stwierdzono po 3 latach eksploatacji wysoką skuteczność przeprowadzonych prac remontowych; potwierdzono dalszą poprawę parametrów po 6 latach od remontu. Ugięcia znormalizowane, szczególnie w przypadku nawierzchni podatnych, osiągnęły spadek nawet o 50%. Potwierdzono zdecydowanie większy wpływ zastosowanych technologii remontu na poprawę parametrów czaszy ugięć w przypadku nawierzchni o konstrukcji podatnej, zaś mniej istotny w przypadku konstrukcji półsztywnej. Prace remontowe dotyczące nawierzchni spowodowały poprawę wskaźników kształtu czaszy ugięć warstw górnych oraz środkowych; najmniejszy wpływ uzyskano w zakresie warstw dolnych po 3 oraz po 6 latach eksplo-

4. CONCLUSIONS

Based on the research and analysis carried out, the following conclusions were drawn:

1. After the 3rd and 6th year of operation, the first signs of damage restoration occurred, with the restoration of mesh cracks reaching a rate of approximately 0.3-0.4%/year of operation and transverse cracks reaching 0.3-0.9%/year.
2. Based on the analysis of the geometric parameters of the deflection basin, the effectiveness of the rehabilitation work carried out was found to be high after 3 years of operation; a further improvement in the parameters 6 years after the rehabilitation was confirmed. Normalised deflections, especially in the case of pavements, have reached a decrease of up to 50%. It was confirmed that the influence of the applied rehabilitation technologies on the improvement of the deflection basin parameters was significantly greater in the case of pavements with a flexible structure, while it was less significant in the case of semi-rigid structures. The pavement rehabilitation works resulted in an improvement in the deflection basin shape indices of the upper and middle

atacji. W przypadku nawierzchni o konstrukcji półsztywnej wpływ remontu na parametry czaszy ugięć był mniejszy niż w przypadku nawierzchni o konstrukcji podatnej. Natomiast dla nawierzchni z podbudową betonową wpływ remontu był najniższy, co obniżało efektywność prac naprawczych w przypadku podbudowy z chudego betonu. Podbudowa ta była w pogorszonym stanie, co prawdopodobnie powodowało, że konstrukcja nawierzchni zachowywała się jak nawierzchnia podatna. Potwierdza to obserwacja poprawy parametrów czaszy ugięć po 3 i 6 latach eksploatacji, zbliżona do tych, które odnotowano w nawierzchniach z grupy podatnych.

3. Zaobserwowano dalszą poprawę niektórych parametrów geometrii czaszy ugięć po 6 latach eksploatacji względem oceny po 3 latach eksploatacji, co można tłumaczyć m.in. skutecznością działania zastosowanego zbrojenia geosiatkami szklanymi i szklano-węglowymi, które zaczynają funkcjonować w konstrukcji nawierzchni w momencie wystąpienia większych odkształceń, np. na skutek ostatecznego osiadania wykonanej konstrukcji nakładki asfaltowej, czy odtworzenia się uszkodzenia zlokalizowanego w obrębie podbudowy.
4. Analiza modułów sztywności wykazała, że na 11 ocenianych odcinków nośność była zapewniona we wszystkich przypadkach obliczonych na podstawie analizy średnich modułów sztywności. W przypadku zastosowania w obliczeniach modułów sztywności percentylu rzędu 0,05, trzy odcinki utraciły projektowaną nośność przed zakończeniem zakładanego 8-letniego okresu eksploatacji. Jednak ich stan na podstawie oceny wizualnej był dobry i niewiele uszkodzeń uległo odtworzeniu.

Ocena efektywności weekendowych remontów ulic Warszawy, oparta na analizie parametrów czaszy ugięć, wykazała pozytywne wyniki. Przeprowadzone naprawy pozwoliły szybko przywrócić nośność nawierzchni, umożliwiając bezpieczne użytkowanie dróg przez kilka-kilkanaście kolejnych lat. Krótkoterminowa poprawa była wyraźna, a prognozy wskazują na kilkuletnią trwałość, co potwierdza skuteczność zastosowanych metod naprawczych. Do czynników wpływających na dobrą odporność zmęczeniową jest stosowanie betonu asfaltowego o wysokim module sztywności [12] oraz asfaltów wysokomodyfikowanych [13].

layers; the lowest impact was obtained for the lower layers after 3 and after 6 years of operation. In the case of a semi-rigid pavement, the effect of rehabilitation on the parameters of the deflection basin was smaller than in the case of a flexible structure pavement. In contrast, for pavements with concrete subbase, the impact of rehabilitation was lowest, reducing the effectiveness of the repair work for the lean concrete subbase. This subbase was in a deteriorated condition, which probably caused the pavement structure to behave as a flexible pavement. This is proven by the observation of improved deflection basin parameters after 3 and 6 years of operation, similar to those observed in the group of flexible pavements.

3. A further improvement in some parameters of the deflection basin geometry was observed after 6 years of operation compared to the assessment after 3 years of operation, which can be explained, among others, by the effectiveness of the applied reinforcement with glass and glass-carbon geogrids, which begin to function in the pavement structure when larger strains occur, e.g. as a result of the final settlement of the completed bitumen overlay structure or the restoration of damage located within the subbase.
4. The stiffness modulus analysis showed that out of the 11 sections evaluated, load-bearing capacity was provided in all cases calculated from the mean stiffness modulus analysis. When using percentile stiffness moduli of 0.05 in the calculations, three sections lost their design load-bearing capacity before the end of the assumed 8-year service life. However, their condition based on visual assessment was good and little damage was restored.

An evaluation of the effectiveness of Warsaw weekend road rehabilitation, based on an analysis of deflection basin parameters, showed positive results. The repairs carried out quickly restored the load-bearing capacity of the pavement, enabling the roads to be used safely for several years to come. Short-term improvements were evident and projections indicate several years of sustainability, confirming the effectiveness of the rehabilitation methods used. Factors contributing to good fatigue resistance include the use of high-modulus asphalt concrete [12] and highly modified asphalts [13].

W dalszych etapach analiz planowana jest kontynuacja monitorowania stanu technicznego nawierzchni, co pozwoli na zebranie szerszego zestawu danych i dokładniejsze określenie momentu, w którym nawierzchnia osiągnie punkt krytyczny, czyli etap końca swojej żywotności. Będzie to kluczowe w kontekście opracowania strategii przyszłych napraw i planowania cykli remontowych umożliwiających optymalne wykorzystanie zasobów.

Warto zauważyć, że w ostatnich latach ponownie naprawiono nawierzchnie remontowane wcześniej w latach 2004-2006, czyli po nawet 18-20 latach eksploatacji od czasu szybkiego remontu. Powrót tych samych odcinków dróg do napraw po niemal dwóch dekadach użytkowania wskazuje na ich solidną żywotność, często przekraczającą prognozy obliczeniowe, ale także podkreśla konieczność regularnej modernizacji infrastruktury. Co istotne, cykl naprawy i ponownego wykorzystania materiałów i infrastruktury w pełni wpisuje się w ideę gospodarki obiegu zamkniętego (GOZ), której założeniem jest minimalizacja odpadów i maksymalne wykorzystanie zasobów [14, 15]. Zastosowanie w nowo remontowanych nawierzchniach drogowych granulatu asfaltowego pochodzącego z wyeksploatowanej nawierzchni jest możliwe do błyskawicznego wdrożenia w ramach szybkich remontów. Kontynuowanie tego podejścia w kolejnych latach może nie tylko przyczynić się do poprawy stanu technicznego dróg, ale również ograniczyć koszty i zasoby potrzebne do kolejnych napraw, wzmacniając tym samym długoterminową efektywność infrastruktury drogowej.

In the next stages of the analyses, it is planned to continue monitoring the condition of the pavement, which will allow a broader set of data to be collected and a more accurate determination of the point at which the pavement reaches the critical point, the end-of-life stage. This will be crucial in terms of developing a strategy for future repairs and planning rehabilitation cycles to enable optimum use of resources.

It is noteworthy that pavements previously repaired between 2004 and 2006 have been repaired again in recent years, i.e. after up to 18-20 years of service since the rapid repair. The same road sections being repaired again after almost two decades of use indicates their good lifespan, often exceeding calculation forecasts, but also highlights the need for regular infrastructure upgrades. Importantly, the cycle of repairing and reusing materials and infrastructure is fully in line with the concept of circular economy (CE), the premise of which is to minimise waste and maximise resource use [14, 15]. The use of bitumen granules from depleted bitumen pavement in newly rehabilitated road pavements can be implemented rapidly as part of rapid rehabilitation. Continuing this approach in the years to come can not only improve the condition of the roads, but also reduce the costs and resources needed for subsequent repairs, thus strengthening the long-term efficiency of the road infrastructure.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Sybilski D., Mechowski T., Sudyka J.: Raport o stanie technicznym ulic Warszawy. IBDiM, Warszawa, 2003
- [2] Żółciak T.: Oto prezydenci Warszawy, którzy najwięcej inwestowali. Dziennik Gazeta Prawna, 2018, <https://gospodarka.dziennik.pl/news/artykuly/578955,warszawa-prezydent-inwestycje-gronkiewicz-waltz-lech-kaczynski-piskorski-kozak-marcinkiewicz-kochalski.html>, 29.07.2024
- [3] Sybilski D., Styk S.: Zalecenia wykonywania cienkich warstw ścieralnych „na gorąco” bitumicznych nawierzchni drogowych (ZW-CWG-95). Zasady wykonywania nawierzchni z mieszanki mineralno-bitumicznej o nieciągłym uziarnieniu (ZW-MMB-NU-95). Seria „I” – Informacje i instrukcje, zeszyt 50, IBDiM, Warszawa, 1995
- [4] Maliszewska D., Maliszewski M., Rembelski R.: The effectiveness of weekend road rehabilitations in Warsaw on the basis of deflection basin indices. Roads and Bridges – Drogi i Mosty, **20**, 3, 2021, 311–323, DOI: 10.7409/rabdim.021.018
- [5] Paplauskas P., Vaitkus A., Kleizienė R.: Analysis of flexible pavement performance prediction models based on structural behaviour. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **18**, 4, 2019, 255-265, DOI: 10.7409/rabdim.019.017
- [6] Horak E., Hefer A., Emery S., Maina J.: Flexible road pavement structural condition benchmark methodology incorporating structural condition indices derived from Falling Weight Deflectometer deflection bowls. Journal of Civil Engineering and Construction, **4**, 1, 2015
- [7] Judycki J., Jaskuła P., Pszczola M., Alenowicz J., Dołżycki B., Jaczewski M., Ryś D., Stienss M.: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2012
- [8] Judycki J., Jaskuła P., Pszczola M., Ryś D., Jaczewski M., Alenowicz J., Dołżycki B., Stienss M.: Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2014

- [9] Bańkowski W., Gajewska B., Gajewski M., Graczyk M., Grygierek M., Harasim P., Horodecka R., Kłosek K., Kraszewski C., Krysiński L., Maliszewski M., Mechowski T., Mirski K., Sudyka J., Wilczek B.J., Wróbel A., Zofka A.: Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa, 2014
- [10] Maliszewski M., Harasim P., Maliszewska D., Zofka A.: Evaluation of long-term glass-grid test section using a unique method. *Materials and Infrastructures* 2, **5B**, 2016, 45-58, DOI: 10.1002/9781119318613.ch4
- [11] Zieliński P.: Effectiveness of the steel mesh track in repairing asphalt pavements in Małopolska region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **356**, 2018, ID article: 012017, DOI: 10.1088/1757-899X/356/1/012017
- [12] Bańkowski W.: Analysis of fatigue life of asphalt concretes considering different types of mixtures and binders. *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, **17**, 4, 2018, 253-270, DOI: 10.7409/rabdim.018.016
- [13] Bańkowski W., Gajewski M., Horodecka R., Mirski K., Targowska-Lech E., Jasiński D.: Assessment of the effect of the use of highly-modified binder on the viscoelastic and functional properties of bituminous mixtures illustrated with the example of asphalt concrete for the binder course. *Construction and Building Materials*, **296**, 2021, ID article: 123412, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123412.
- [14] Maliszewski M., Bańkowski W., Sudyka J., Kamińska E.: Szybkie remonty nawierzchni a gospodarka o obiegu zamkniętym. *Drogi Samorządowe*, 6 (71), 2023, 1-4
- [15] Mazurek G., Iwański M., Buczyński P., Horodecka R.: Influence of innovative three-element binder on permanent deformations in recycled mixtures with emulsion and foamed bitumen. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **21**, 2021, ID article: 55, DOI: 10.1007/s43452-021-00192-9