



DOMINIKA MALISZEWSKA¹⁾
MACIEJ MALISZEWSKI²⁾
RAFAŁ REMBELSKI³⁾

THE EFFECTIVENESS OF WEEKEND ROAD REHABILITATIONS IN WARSAW ON THE BASIS OF DEFLECTION BASIN INDICES

WERYFIKACJA EFEKTYWNOŚCI WEEKENDOWYCH REMONTÓW ULIC WARSZAWY NA PODSTAWIE PARAMETRÓW CZASZY UGIĘĆ

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono ocenę efektywności rozwiązań wdrożonych z zastosowaniem technologii weekendowych remontów opracowanej przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów dla Zarządu Dróg Miejskich w Warszawie. Głównym celem badawczym była weryfikacja przyjętych rozwiązań projektowych. Technologia remontu ewoluowała na przestrzeni lat, a zmiany były dokonywane na podstawie prowadzonych obserwacji. Pierwotnie podejście oparte było na przyjęciu jednego uniwersalnego rozwiązania, co miało swoje wady i zalety. Najnowsze podejście projektowe, zakładające zastosowanie metod obliczeniowych, wymaga weryfikacji. W tym celu po wykonaniu remontu przystąpiono do oceny diagnostycznej stanu nawierzchni i analizy uzyskanych parametrów kształtu czaszy ugięć. Przeprowadzono diagnostykę wybranych odcinków testowych przed remontem oraz po 3 latach od jego wykonania. W artykule przedstawiono wyniki tej weryfikacji. Planowane jest powtórzenie obserwacji w kolejnych latach eksploatacji nawierzchni w celu ponownej oceny rozwiązania projektowego oraz zaproponowania modeli prognostycznych dla stosowanej technologii remontu.

SŁOWA KLUCZOWE: nośność konstrukcji, ocena nośności, parametry czaszy ugięć, technologia remontu nawierzchni.

ABSTRACT. In the paper the methodology of weekend road rehabilitation developed by the Road and Bridge Research Institute and Warsaw Municipal Road Administration was evaluated in the context of its effectiveness. The main research goal was to evaluate the design procedure. The design methodology of weekend road rehabilitation has been evolving based on observations made during practical applications of the methodology. Initial technology was based on a one-size-fits-all principle, which entailed certain advantages and disadvantages. The newest design approach assumes the use of calculation design methods and needs verification. In order to meet the validation needs, a diagnostic campaign was run to assess pavement condition by means of deflection basin indices. Diagnostic campaigns were run before the rehabilitation and after 3 years of service. This article presents the results of this assessment. Further diagnostic campaigns are planned in future years of service in order to verify the design procedure and propose prognostic models for the design method.

KEYWORDS: bearing capacity assessment, deflection basin parameters, pavement bearing capacity, pavement rehabilitation technology.

DOI: 10.7409/rabdim.021.018

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; dmaliszewska@ibdim.edu.pl (✉)
²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mmaliszewski@ibdim.edu.pl
³⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; rrembelski@ibdim.edu.pl

1. WSTĘP

W 2003 r. Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM) podsumował przeprowadzoną w latach 1998-2001 ocenę diagnostyczną sieci dróg zarządzanych przez Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie [1]. Z pracy tej wynikało, że ponad 50% nawierzchni dróg kwalifikowało się do pełnej przebudowy lub wzmocnienia, prawie 40% kwalifikowało się do wymiany warstw asfaltowych lub wykonania nakładki na warstwie ścieralnej, a zaledwie nieco ponad 10% nie wymagało naprawy. Oszacowano, że całkowity koszt realizacji takiego zakresu prac w tamtym czasie wyniósłby ponad 1,8 mld złotych, przy całkowitym budżecie miasta wynoszącym 5,3 mld, z czego na inwestycje przeznaczone było 0,81 mld złotych [2]. Kompleksowa realizacja planu remontowego była nierealna nawet w wieloletnich planach budżetowych, gdyż budżet na utrzymanie i budowę dróg kształtował się historycznie na poziomie około 0,05-0,15 mld złotych rocznie. W swoim raporcie z oceny diagnostycznej IBDiM zaproponował optymalizację procesu remontowego prowadzącą do szybkiej poprawy stanu technicznego ulic Warszawy.

Pierwszą technologią remontu zaproponowaną przez IBDiM było wykonanie cienkiej warstwy ścieralnej na gorąco według Zeszytu 50 IBDiM [3] oraz warstwy wiążącej o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie według Zeszytu 63 IBDiM [4]. Zalecane było zróżnicowanie grubości wymienianych warstw z uwagi na występowanie ruchu pojazdów ciężarowych lub autobusów. W przypadku dróg o wystarczającej nośności sugerowano wymianę warstwy ścieralnej o grubości 2 cm z wariantowym zastosowaniem siatki zbrojącej w przypadku zaobserwowania spękań. W przypadku dróg o niewystarczającej nośności potrzebna była wymiana całego pakietu warstw asfaltowych, a w razie występowania ruchu autobusowego – wbudowanie 12 cm nowych warstw. Technologie te zastosowano na większą skalę w 2004 r. W ramach nadzoru naukowego IBDiM uzgadniał z wykonawcami robót dobór mieszanek mineralno-asfaltowych i prowadził zaawansowane badania trwałości nawierzchni.

Pierwszą prognozę trwałości remontów weekendowych przeprowadzono w 2006 r. [5]. Oceną objęto 5 wybranych odcinków ulic, zróżnicowanych z uwagi na prognozowane obciążenie ruchem. Analizą objęto badania zrealizowane przed remontem oraz po upływie około 1 roku od remontu. Określono zmianę ugięć nawierzchni oraz wyznaczono moduły sztywności warstw konstrukcyjnych, wykorzystując ugięciomierz dynamiczny FWD [6]. Obliczenia trwałości wykonano na podstawie katalogu [7]. Prognozowana trwałość remontu wynosiła od 8 do 18 lat, można zatem zauważyć, że wstępnie przyjęta technologia przynosiła zróżnicowane rezultaty. Zachodziła potrzeba weryfikacji opracowanych prognoz.

1. INTRODUCTION

In 2003 the Road and Bridge Research Institute (IBDiM) presented a summary of the 1998-2001 diagnostic assessment of the road network managed by the Warsaw Municipal Road Administration (ZDM) [1]. The report indicated that over 50% of road pavements qualified for full reconstruction or strengthening, nearly 40% qualified for replacement of bituminous layers or placement of overlay over the wearing course, while only a proportion slightly greater than 10% did not require repairs. It was estimated that realisation of the full scope of works would have costed over 1.8 billion zł at the time, whereas the total yearly budget of the city equalled 5.3 billion zł and its portion allocated to investments equalled 0.81 billion zł [2]. Comprehensive realisation of the entire rehabilitation project was unfeasible even in long-term budget plans, as the city budget for road maintenance and construction was historically at the level of approx. 0.05-0.15 billion zł per year. In the report from the diagnostic assessment, the IBDiM proposed optimisation of the rehabilitation process, in order to achieve quick improvement of technical condition of streets in Warsaw.

The first rehabilitation technology proposed by the IBDiM consisted in placement of thin hot-mix asphalt wearing course, according to Issue 50 of the IBDiM "I" series [3], and a binder course characterised by improved resistance to rutting and fatigue, according to Issue 63 of the IBDiM "I" series [4]. Adjustment of the thickness of the layers to bus and heavy vehicle traffic was advised. In the case of roads with sufficient bearing capacity, replacement of the existing 2-cm-thick wearing course was suggested, with possible application of inter-layer reinforcement grid if cracks were observed. In the case of roads with insufficient bearing capacity, full replacement of the asphalt layers was necessary, with placement of additional 12 cm of new layers when bus traffic was present. The proposed technology was applied on a larger scale in 2004. Within the scope of its scientific supervision, the IBDiM advised the contractors on the choice of asphalt mixtures and performed advanced tests of pavement life.

The first forecast of service life of streets subjected to weekend rehabilitation was performed in 2006 [5]. The evaluation encompassed 5 chosen street sections that varied in terms of the forecasted traffic load. The analysis was based on tests conducted before the rehabilitation and approx. 1 year after the rehabilitation. The changes in deflections of the pavements and stiffness moduli of structural layers were determined using falling weight deflectometer (FWD) [6]. Calculations of remaining pavement life were

W 2010 roku IBDiM przeprowadził ocenę skuteczności remontów weekendowych zrealizowanych w latach 2004-2009 [8]. Praca opierała się w głównej mierze na analizie wizualnej stanu ulic. Sprawdzano, czy na wyremontowanych nawierzchniach pojawiły się spękania, deformacje lub inne uszkodzenia. Stwierdzono, że 90% powierzchni ocenianych odcinków nie budziło zastrzeżeń, natomiast w przypadku 5% odcinków zauważono uszkodzenia. Na wybranych odcinkach pobrano próbki w celu ustalenia przyczyn wystąpienia uszkodzeń. Najczęstszym typem uszkodzenia były spękania podłużne i poprzeczne, propagujące od podbudowy stabilizowanej cementem. Przyczyną tego zjawiska w ocenianych lokalizacjach był brak siatki wzmacniającej lub niewłaściwie jej zastosowanie. Ustalono, że nie była zachowana minimalna szerokość pasma układowej siatki, tj. minimum 1,5 m szerokości. W niektórych przypadkach wykazano, że pęknięcie uaktywniło się na krawędzi pasma siatki. Innym problemem była wczesna utrata nośności spowodowana lokalnym wyeksploatowaniem podbudowy.

Na podstawie oceny przeprowadzonej w 2010 r. zasugerowano opracowanie bardziej szczegółowych zaleceń technologicznych oraz stwierdzono możliwość poprawy trafności doboru technologii remontu poprzez lepsze jej dostosowanie do stanu konstrukcji wymagającej wzmocnienia. Ustalono, że na podstawie inwentaryzacji występującego przed remontem nasilenia spękań nawierzchni należy podjąć decyzję o lokalnym remoncie podbudowy. Podejście takie wdrożono w 2016 roku. Stało się to możliwe dzięki zastosowaniu najnowszych metod diagnostycznych oraz wykorzystaniu metod numerycznych według katalogu [9]. Niektóre ulice z uwagi na zły stan konstrukcji nie mogły zostać wyremontowane i zalecono ich pełną przebudowę. Przypadki te nie zostały omówione w niniejszym artykule. Niebagatelną rolę w zachowaniu trwałości nawierzchni po remoncie odgrywało właściwe zastosowanie zbrojenia geosyntetycznego [10], które z uwagi na stan podbudowy (spękania w przypadku podbudów związanych, zmienność właściwości w przypadku trylinki, kamienia polnego czy bruku, lokalne osłabienie lub wyczerpanie nośności podłoża) stanowiło dodatkowe zabezpieczenie przed przedwczesną degradacją.

Technologie remontu rozwijano i dostosowywano do potrzeb remontowych Aglomeracji Warszawskiej, z uwzględnieniem warunków ruchowych panujących na ulicach. W przeciwieństwie do remontowanych nawierzchni zamiejskich [11], niektóre nawierzchnie miejskie poddawane są obciążeniom od ruchu ciężkiego i powolnego, co powinno być uwzględnione przy projektowaniu konstrukcji. Do wyznaczenia przekroju konstrukcyjnego naprawy nawierzchni mogą być wykorzystywane metody obliczeniowe według AASHTO, MEPDG [12], [13]. Dobierane są materiały i technologie dostosowane

performed based on the catalogue [7]. As the evaluated service life of the rehabilitated sections ranged from 8 to 18 years, it was observable that application of the initially adopted technology led to variable results. The obtained forecasts required verification.

In 2010 the IBDiM evaluated the effectiveness of weekend rehabilitations realised in the years 2004-2009 [8]. The evaluation was primarily based on visual assessment of the condition of streets and involved verification whether cracks, deformations or other distress appeared in the rehabilitated pavements. It was ascertained that 90% of the area of the rehabilitated sections were undamaged beyond all doubt, while 5% were visibly distressed. Specimens were extracted on chosen sections in order to determine the causes of the noted damage. The most frequent types of distress included transverse and longitudinal cracking, which propagated upwards from cement-stabilised base course. The phenomenon at the evaluated locations was caused by lack of reinforcement grid or its incorrect application. The minimum width of the strip of the grid (i.e. 1.5 m) had not been observed during placement. It was established that in some cases cracks appeared over the edge of the strip of the grid. Other problems included premature loss of bearing capacity due to local exploitation of the base layer.

Based on the evaluation conducted in 2010, preparation of more detailed technological guidelines was suggested. It was established that rehabilitation technology may be chosen more accurately through a more detailed analysis of the condition of distressed structure. It was determined that a local repair of the base course may be deemed necessary based on the survey of cracks visible on the surface. Such an approach was introduced in 2016, owing to the use of the newest diagnostic methods and application of numerical methods, according to the catalogue [9]. Some streets could not be rehabilitated due to unsatisfactory condition of the structure – in such cases full reconstruction was advised. These cases are not described in this article. Correct application of geosynthetic reinforcement played a considerable role in terms of maintenance of pavement service life [10], as it acted as additional protection against premature degradation due to the state of the base course (cracks in stabilised bases, variability of properties of “Trylinka” hexagonal concrete blocks, cobblestone or stone blocks, local weakening or failure of the subgrade).

The rehabilitation technologies were developed and adapted to the needs of the Warsaw metropolitan area, taking into account the traffic conditions on the streets. In contrast to rehabilitated pavements outside of the urban

do warunków miejskich oraz technologii zwiększające trwałość i opóźniające degradację konstrukcji (np. mieszanki o wysokim module sztywności AC WMS, mieszanki SMA, asfalty modyfikowane lub wysokomodyfikowane w wypadku obciążenia ruchem KR5 lub wyższym, zbrojenie geosyntetyczne nawierzchni).

Do wykonania nakładki zastosowano asfaltową warstwę ścierną z mieszanki SMA 8 S PMB 45/80-65. Do wykonania warstwy wiążącej zastosowano beton asfaltowy o wysokim module sztywności AC WMS 16 PMB 25/55-60. Warstwę wyrównawczą wykonano z mieszanki AC 8 S 50/70. Pomiędzy warstwą wiążącą a wyrównawczą zainstalowano siatkę szklaną powlekaną asfaltem o wytrzymałości na rozciąganie $\geq 120/120$ kN/m i wydłużeniu przy zerwaniu $\leq 3,0\%$, wklejaną na ciepło ze wstępnym naciąganiem mechanicznym.

Przy planowaniu zabiegów remontowych zastosowano metodę AASHTO. Remonty weekendowe poprzedzone były kompleksową oceną stanu technicznego konstrukcji nawierzchni zgodnie z katalogiem [14]. Ocena taka obejmowała przede wszystkim:

- oględziny (ocenę wizualną),
- pomiary grubości nawierzchni metodą niszczącą oraz georadarową GPR,
- badania ugięć przy pomocy ugięciomierza dynamicznego FWD,
- wyznaczenie modułów sztywności warstw konstrukcyjnych,
- wyznaczenie parametrów mechanistycznych modelu półprzestrzeni sprężystej,
- badania mieszanek mineralno-asfaltowych pobranych z nawierzchni (odporność na deformacje trwałe, zawartość wolnych przestrzeni oraz zawartość lepiscza rozpuszczalnego).

Projektowanie wzmocnienia nawierzchni rozpoczynano od rozpoznania stanu istniejącego, tj. od oceny sztywności poszczególnych warstw (grup warstw) konstrukcyjnych, podbudowy oraz podłoża. Spośród rozpoznanych rodzajów podbudów występujących na warszawskich ulicach wyróżnia się przede wszystkim:

- podbudowy związane (np. beton, stabilizacja cementem),
- podbudowy brukowane (np. kamienna kostka brukowa, trylinka, kamień polny),
- podbudowy niezwiązane (np. kruszywo, kruszywo z destruktem betonowym i ceglanym).

W projektowaniu wzmocnienia wykorzystano model półprzestrzeni sprężystej wielowarstwowej. Dane materiałowe dotyczące sztywności poszczególnych warstw z podziałem na pakiet warstw asfaltowych (jako całość), podbudowę oraz podłoże pochodziły z badań ugięciomierzem dynamicznym

area [11], some urban pavements are subjected to loading from heavy and slow traffic, which should be taken into account in pavement design. The structural layer arrangement of the repaired pavement may be designed based on calculations according to AASHTO, MEPDG [12], [13]. Materials and technologies adjusted to urban conditions are selected along with technologies that prevent degradation and enable life extension (e.g. high-modulus asphalt concrete HMA, stone mastic asphalt SMA, modified or highly modified bitumen for traffic categories of KR5 or higher, geosynthetic pavement reinforcement).

The overlay was placed using wearing course asphalt mixture SMA 8 S PMB 45/80-65. The binder course was constructed from high-modulus asphalt concrete AC HMA 16 PMB 25/55-60. Levelling course consisted of AC 8 S 50/70 mixture. Pre-bituminised glass fibre grid was installed at the interface between the binder and the levelling course. The grid, characterised by tensile strength $\geq 120/120$ kN/m and strain at rupture $\leq 3,0\%$, was placed hot, with initial mechanical tensioning.

The rehabilitation measures were planned using the AASHTO method. Weekend rehabilitations were preceded with comprehensive assessment of the technical state of the pavement structure, according to the catalogue [14]. Such assessment encompassed primarily:

- visual survey,
- thickness measurements using destructive and non-destructive (GPR) methods,
- deflection measurements using the FWD device,
- determination of stiffness moduli of structural layers,
- determination of mechanistic parameters of the elastic half-space model,
- tests of asphalt mixtures extracted from the pavement (resistance to permanent deformation, air voids and soluble binder content).

The first stage of design of pavement strengthening consisted in evaluation of the existing condition, i.e. assessment of stiffness of particular layers (groups of layers), base course and subgrade. Among the identified types of base courses used on the streets of Warsaw, the following were predominant:

- hydraulically-bound bases (e.g. concrete, cement stabilization),
- stone- or concrete-paved bases (e.g. stone blocks, concrete hexagonal “Trylinka” blocks, cobblestone),
- unbound bases (e.g. aggregate, aggregate with crushed recycled concrete or bricks).

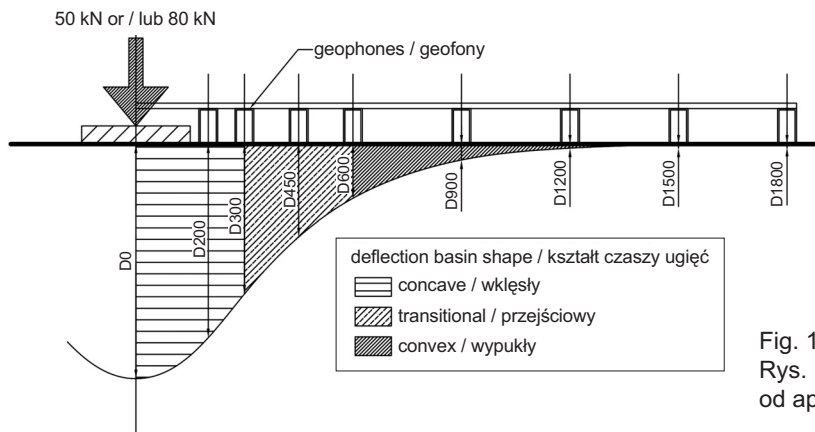
FWD i obliczeń odwrotnych przy użyciu oprogramowania Elmod. Pomiar modułów sztywności na każdym z ocenianych odcinków był wykonywany na każdym pasie ruchu co 25 m. Z uwagi na dużą zmienność modułów sztywności oraz lokalne występowanie niskich wartości, ostateczne wartości modułów sztywności poszczególnych warstw wykorzystane w analizie mechanistycznej dla danej ulicy przyjęto jako percentyl rzędu 0,05, co stanowi podejście bezpieczne i możliwe do zweryfikowania w przyszłości.

Celem niniejszego artykułu jest weryfikacja efektywności zrealizowanych remontów wybranych odcinków 11 ulic na podstawie parametrów kształtu czaszy ugięć, które są często stosowane w ocenie stanu konstrukcji [15]. Weryfikację prowadzono 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.

2. METODYKA OCENY WZMOCNIENIA

Do analizy wytypowano 11 odcinków ulic zróżnicowanych pod względem kategorii ruchu, rodzaju podbudowy i grubości konstrukcji. Każda z remontowanych ulic została zaklasyfikowana do przebudowy z uwagi na zły stan wizualny lub wymagane wzmocnienie. Parametry techniczne ulic – w tym grubość warstw konstrukcyjnych, typ podbudowy oraz kategorię obciążenia ruchem – przedstawia Tabl. 1.

Aby dokonać oceny zrealizowanego wzmocnienia wykonano badania ugięciomierzem dynamicznym FWD w 2016 r., tj. przed remontem nawierzchni, oraz w 2019 roku, czyli po trzech latach po remoncie. Na podstawie tych badań wyznaczono charakterystyki kształtu czaszy ugięć, które stanowią odzwierciedlenie stanu nawierzchni (Rys. 1). Przedstawione parametry mogą dotyczyć stanu górnych warstw nawierzchni, podbudowy lub podłoża [16]. Zastosowane w analizie parametry geometrii czaszy ugięć wraz z krótką charakterystyką przedstawia Tabl. 2.



Design calculations were based on the multi-layered elastic half-space model. In the model the pavement was divided into: the asphalt courses (treated as a single layer), base course and subgrade. Material data representing the stiffness of particular layers were obtained from FWD tests and backcalculations performed in Elmod software. Stiffness measurements were performed every 25 m along each lane of the analysed sections. Due to considerable variability in stiffness moduli and local occurrence of low values, the final values of stiffness moduli of particular layers assumed for mechanistic analysis equalled to the 5th percentile. Such an approach is safe and enables future verification of the adopted values.

The aim of this article is to verify the effectiveness of the rehabilitation works performed on selected sections of 11 streets. Verification is based on deflection basin parameters, which are often used in assessment of pavement condition [15]. Analysis was performed on chosen sections, on which the rehabilitation technology was determined and applied in 2016. The assessment of rehabilitation effectiveness was carried out after 3 years of service, i.e. in 2019.

2. METHODOLOGY OF EVALUATION

The analysis encompassed 11 chosen street sections with varied traffic load, base course type and structure thickness. Each of the analysed streets had been classified for reconstruction due to unsatisfactory visual state or required strengthening. The technical parameters of the streets – including thickness of structural layers, type of base course and traffic category – are presented in Table 1.

In order to evaluate the effectiveness of the performed strengthening, FWD measurements were performed both in 2016 (i.e. before the rehabilitation works) and in 2019 (three years after the rehabilitation). Deflection basin parameters determined from the FWD tests are a measure of the condition of the pavement (Fig. 1). The presented parameters may reflect the condition of the upper layers, the base or the subgrade [16]. Deflection basin parameters used in the analysis are presented and briefly characterised in Table 2.

Fig. 1. Scheme of FWD loading of road pavement
Rys. 1. Schemat obciążenia nawierzchni drogowej od aparatu FWD

Table 1. Street sections in Warsaw chosen for evaluation
 Tablica 1. Odcinki ulic na terenie m.st. Warszawy wybrane do oceny

Street Ulica	Section Odcinek	Thickness according to the technology Grubość według technologii [cm]				Base Podbudowa	Change in elevation Zmiana niwelety [cm]	Base type (structure type) Rodzaj podbudowy (typ konstrukcji)	Traffic KR
		Overlay / Nakładka							
		Wear Ś	Bin W	Level Wyr	Real Rz				
al. Niepodległości	Wiktorska – Wilanowska	3	7	2	11.2	21	0.0	concrete (semi-rigid) beton (półsztywna)	3
Cyrulików	Chruściela – granica miasta (Okuniewska)	3	11	2	14.6	20	+6.0	unbound (flexible) niezwiązana (podatna)	3
Gołkowska	Czeriakowska – Statkowskiego	3	10	2	11.7	20	+2.0	lean concrete (semi-rigid) chudy beton (półsztywna)	3
Grzybowa	Instruktorska – Komandosów	3	9	2	10.3	25	+4.0	lean concrete (semi-rigid) chudy beton (półsztywna)	3
Kinowa	al. Waszyngtona – al. Stanów Zjednocz.	3	8	2	25.2	15	+7.0	unbound (flexible) niezwiązana (podatna)	3
Kraśińskiego	pl. Wilsona – Wybrzeże Gdyńskie	3	10	2	11.5	18	+3.0	lean concrete (semi-rigid) chudy beton (półsztywna)	3
Lektykarska	Podleśna – Gdańska	3	7	2	13.7	20	+2.0	lean concrete (semi-rigid) chudy beton (półsztywna)	2
Nowoursynowska	Wałbrzyska – Dolina Służewiecka	3	5	2	9.6	25	0.0	concrete (semi-rigid) beton (półsztywna)	4
Okuniewska	Cyrulików – Praskiego Pułku + 400 m	3	12	2	13.8	26	+2.0	unbound (flexible) niezwiązana (podatna)	4
Rembielińska	Matki Teresy – S8	3	7	2	14.3	17	0.0	lean concrete (semi-rigid) chudy beton (półsztywna)	3
Strażacka	Chełmżyńska – Zesłańców Polskich	3	12	2	14.8	22	+14.0	stone blocks (flexible) bruk (podatna)	4

Traffic / KR – traffic category (the greater the number of ESALS, the greater the category) / kategoria ruchu,

Wear / Ś – SMA 8 S wearing course / warstwa ścieralna z mieszanki SMA 8 S,

Bin / W – AC HMA 16 binder course / warstwa wiążąca AC WMS 16,

Level / Wyr – AC 8 S levelling course (pre-bituminised glass fibre grid was placed at the interface of the levelling and binder courses) / warstwa wyrównawcza z AC 8 S (pomiędzy warstwą wyrównawczą i wiążącą wbudowano siatkę szklaną powlekaną asfaltem),

Real / Rz – Actual total thickness of the asphalt courses identified through control coring / rzeczywista grubość warstw na podstawie odwiertów kontrolnych.

Table 2. Deflection basin parameters used in the analysis (based on [16])
 Tablica 2. Parametry kształtu czaszy ugięć zastosowane w analizie (na podstawie [16])

Parameter / Parametr	Formula (assessment of the value) Równanie (ocena wartości)	Interpretation in terms of depth of interaction in the pavement / Odniesienie do głębokości oddziaływania w konstrukcji
Maximum deflections Maksymalne ugięcia D_0, D_{0norm}	D_0 – deflections measured under the centre of the loading plate / ugięcia mierzone centralnie pod płytą obciążającą, $D_{0norm} - D_0$ normalised to the test loading (the lower the better) / jw. D_0 , lecz znormalizowane względem obciążenia badawczego (im mniejsze tym lepiej)	Gives an indication of the state of all structural layers with approx. 70% contribution of the subgrade Miara stanu wszystkich warstw nawierzchni z 70-procentowym udziałem podłoża
Radius of curvature Promień czaszy ugięć RoC	$RoC = \frac{L^2}{2D_0 \left(\frac{D_0}{D_{200}} - 1 \right)}$ in the case of FWD measurements: $L = 200$ mm for the FWD (the higher the better) w przypadku pomiarów urządzeniem FWD: $L=200$ mm (im większy tym lepiej)	Indication of the structural condition of the upper layers and the top part of the base Stan górnych warstw nawierzchni oraz górnej strefy podbudowy

Table 2 (continued). Deflection basin parameters used in the analysis (based on [16])
 Tablica 2 (ciąg dalszy). Parametry kształtu czaszy ugięć zastosowane w analizie (na podstawie [16])

Parameter / Parametr	Formula (assessment of the value) Równanie (ocena wartości)	Interpretation in terms of depth of interaction in the pavement / Odniesienie do głębokości oddziaływania w konstrukcji
Area under pavement profile Pole powierzchni odkształcenia nawierzchni	$A_{UPP} = \frac{5D_0 - 2D_{300} - 2D_{600} - D_{900}}{2},$ the lower the better / im mniejsze tym lepiej	Condition of the upper layers of the pavement Stan górnych warstw nawierzchni
Base Layer Index or Surface Curvature Index Wskaźnik stanu podbudowy <i>SCI300 (BLI)</i>	$SCI = BLI = D_0 - D_{300},$ the lower the better / im mniejszy tym lepiej	Condition of the base layer Stan podbudowy
Middle Layer Index or Base Damage Index Wskaźnik stanu środkowych warstw nawierzchni lub wskaźnik uszkodzenia podbudowy <i>BDI600 (MLI)</i>	$BDI = MLI = D_{300} - D_{600},$ the lower the better / im mniejszy tym lepiej	Condition of the subbase and selected layers Stan podbudowy pomocniczej oraz wybranych warstw
Lower Layer Index or Base Curvature Index Wskaźnik stanu niższych warstw; wskaźnik kształtu podbudowy <i>BCI900 (LLI)</i>	$BCI900 = LLI = D_{600} - D_{900}$ the lower the better / im mniejszy tym lepiej	Condition of lower structural layers and the subgrade Stan niższych warstw oraz podłoża

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W celu zobrazowania stanu nawierzchni przed zabiegami remontowymi na Rys. 2 zaprezentowano statystykę zinventaryzowanych uszkodzeń. Wśród wszystkich uszkodzeń stwierdzonych przed remontem na zbadanych odcinkach ulic dominowało koleinowanie (ponad 50%, koleina mała – do 10 mm, koleina duża – powyżej 10 mm) oraz spękania siatkowe, stanowiące około 25% wszystkich obserwacji. Pozostałe to spękania podłużne oraz poprzeczne, łaty na nawierzchni oraz wyboje, stanowiące w sumie niespełna 25% obserwacji.

Na podstawie badań ugięciomierzem FWD przeanalizowano ugięcia znormalizowane przed remontem (2016 r.) oraz 3 lata po remoncie (2019 r.), dające pogląd na stan konstrukcji nawierzchni, jak również promień czaszy ugięć, pokazujący stan górnych warstw oraz podbudowy (Tabl. 3, Rys. 3). Na rysunku tym zaprezentowano obliczone przedziały ufności wartości średniej przy poziomie ufności 95%. Do obliczenia przedziałów ufności wykorzystano indywidualne odchylenia standardowe. Stwierdzono, że po remoncie nastąpiło zmniejszenie średniej wartości ugięć znormalizowanych nawierzchni o około 36%, zwiększenie średniej wartości promienia czaszy ugięć o 19% oraz zmniejszenie średniego pola powierzchni pod czaszą ugięć o 57% (wszystkie różnice istotne statystycznie według testu *t*-studenta). Przy ocenie

3. RESULTS AND THEIR ANALYSIS

In order to visualise the state of the pavement before rehabilitation, a statistical breakdown of the surveyed distresses is presented in Fig. 2. Among all types of damage observed before rehabilitation on the surveyed sections, rutting (over 50%, small rut – up to 10 mm, large rut – over 10 mm) and alligator cracks (approx. 25% of all observations) were dominant. Other types, making up nearly 25% of all observations, include longitudinal and transverse cracking, patches and potholes.

Based on the FWD tests, normalised deflections registered before the rehabilitation (2016) and 3 years after the rehabilitation (2019) were analysed as a measure of the condition of the pavement. The radius of curvature of the deflection basin, which is an indicator of the state of the upper layers and base course (Table 3, Fig. 3), was analysed as well. This figure presents the calculated confidence intervals of mean values at the adopted confidence level of 95%. Confidence intervals were calculated based on individual standard deviations. It was observed that after rehabilitation the mean value of normalised pavement deflections decreased by approx. 36%, the mean radius of curvature increased by 19% and the mean area under pavement profile decreased by 57% (all the changes are

tych parametrów w kontekście typu konstrukcji można zauważyć, że większe różnice wystąpiły w przypadku nawierzchni podatnych (podbudowa niezwiązana lub brukowcowa) niż w przypadku nawierzchni półsztywnych (podbudowa z betonu lub chudego betonu). Średnie ugięcia znormalizowane D_{0norm} w grupie konstrukcji podatnych obniżyły się o 52%, a w grupie konstrukcji półsztywnych tylko o 5%. W przypadku średniego promienia czaszy ugięć RoC na odcinkach o konstrukcji podatnej wartość parametru wzrosła o 117%, zaś na odcinkach o konstrukcji półsztywnej zmniejszyła się o 1%. Wykazano również, że średnie pole powierzchni pod czaszą ugięć A_{UPP} na odcinkach o konstrukcji podatnej zmalało o 70%, zaś na odcinkach o konstrukcji półsztywnej zmalało o 24%.

statistically significant, based on the Student's t -test). Considering the differences in the aforementioned parameters in various pavement types, greater changes occurred in the case of flexible pavements (unbound or paving stone bases) than in the case of semi-rigid pavements (concrete or lean concrete bases). Mean normalised deflections D_{0norm} in the group of flexible pavements decreased by 52%, whereas in the group of semi-rigid pavements – by only 5%. In the case of radius of curvature on sections with flexible pavements, the mean value increased by 117%, while on sections with semi-rigid structures it decreased by 1%. It was also observed that the mean area under pavement profile A_{UPP} decreased by 70% on sections with flexible pavements and decreased by 24% on sections with semi-rigid pavements.

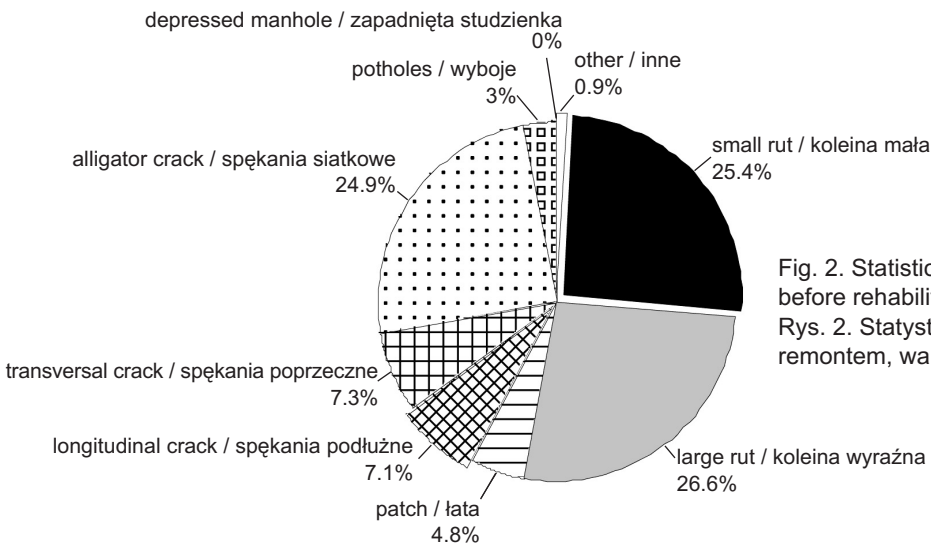


Fig. 2. Statistical breakdown of the distresses surveyed before rehabilitation, value in [%], (results include year 2016)
Rys. 2. Statystyka inwentaryzacji nawierzchni przed remontem, wartości w [%], (wyniki obejmują rok 2016)

Table 3. Analysis of the results of deflection measurements and calculations of deflection basin parameters RoC and A_{UPP}

Tablica 3. Analiza wyników badań ugięć i obliczeń parametrów kształtu czaszy ugięć RoC i A_{UPP}

Year / Rok	Parameter / Parametr	Type of base / Rodzaj podbudowy			
		Concrete Betonowa	Lean concrete Chudy beton	Unbound Niezwiązana	Paving stone Brukowcowa
		Type of structure / Typ konstrukcji			
		Semi-rigid Półsztywna	Semi-rigid Półsztywna	Flexible Podatna	Flexible Podatna
		Mean values / Średnie wartości			
2016	D_{norm} [μm]	116	340	492	393
	RoC [μm]	3780	1190	567	470
	A_{UPP} [μm]	73	353	641	513
2019	D_{norm} [μm]	148	283	238	183
	RoC [μm]	3545	1379	1009	1245
	A_{UPP} [μm]	85	237	191	159

Table 3 (continued). Analysis of the results of deflection measurements and calculations of deflection basin parameters RoC and A_{UPP}

Tablica 3 (ciąg dalszy). Analiza wyników badań ugięć i obliczeń parametrów kształtu czaszy ugięć RoC i A_{UPP}

Analysis of change / Analiza zmian	Parameter / Parametr	Type of base / Rodzaj podbudowy			
		Concrete / Betonowa	Lean concrete / Chudy beton	Unbound / Niezwiązana	Paving stone / Brukowcowa
		Type of structure / Typ konstrukcji			
		Semi-rigid / Półsztywna	Semi-rigid / Półsztywna	Flexible / Podatna	Flexible / Podatna
		Comparison / Porównanie			
According to the type of base / Z uwagi na rodzaj podbudowy	D_{norm} [μm]	28% (0.006)	-17% (0.001)	-52% (0.000)	-53% (0.000)
	RoC [μm]	-6% (0,754)*	16% (0.482)*	78% (0.000)	165% (0.010)
	A_{UPP} [μm]	16% (0.334)*	-33% (0.000)	-70% (0.000)	-69% (0.000)
According to the type of structure / Z uwagi na typ konstrukcji	D_{norm} [μm]	-5% (0.044)		-52% (0.000)	
	RoC [μm]	-1% (0.806)*		117% (0.000)	
	A_{UPP} [μm]	-24% (0.000)		-70% (0.000)	
Total / Globalnie	D_{norm} [μm]	-36% (0.000)			
	RoC [μm]	19% (0.040)			
	A_{UPP} [μm]	-57% (0.000)			

The values in parentheses are the p-values from the Student's t-test for the difference of two mean values; if p-value is less than 0.05, statistical significance is confirmed; values marked with * are statistically insignificant
 Wartości w nawiasach przedstawiają statystyki P dla testu t-Studenta różnicy dwóch średnich; wartość P mniejsza niż 0,05 potwierdza istotność statystyczną; wartości oznaczone * są nieistotne statystycznie

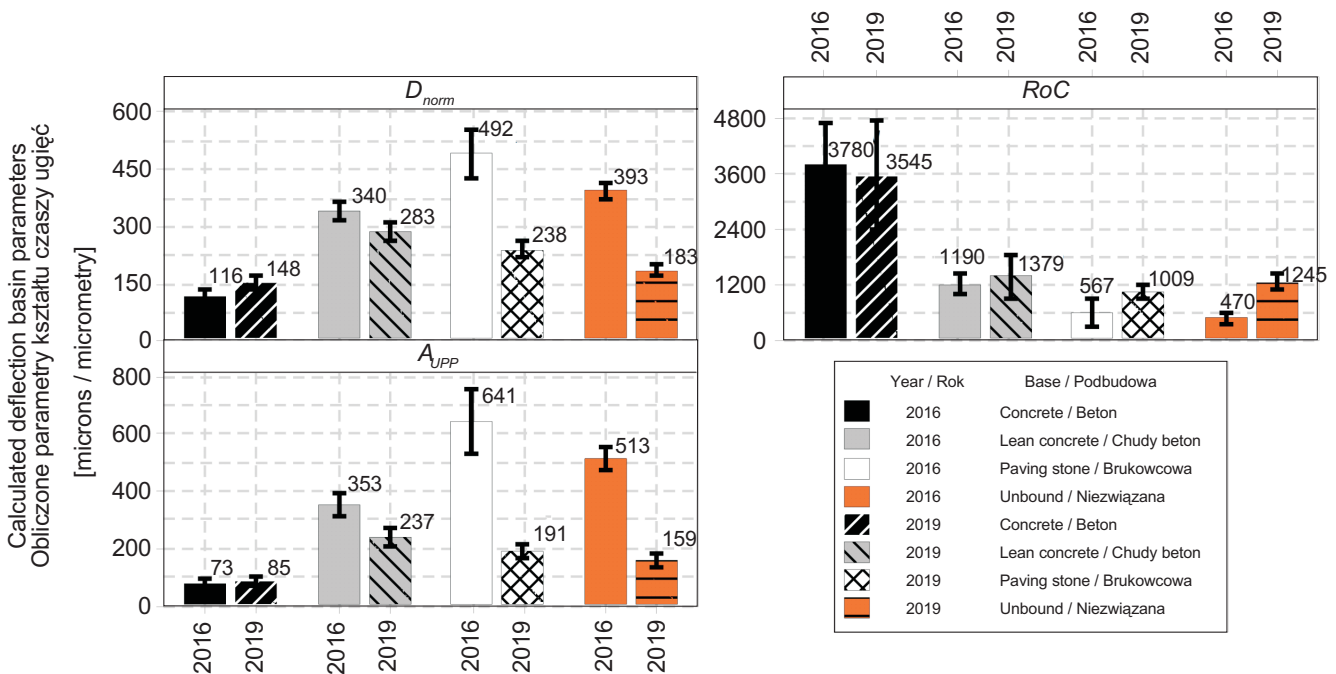


Fig. 3. Results of deflection measurements and calculations of deflection basin parameters RoC and A_{UPP} (95% CI for the Mean; individual standard deviations are used to calculate the intervals)

Rys. 3. Wyniki badań ugięć i obliczeń parametrów kształtu czaszy ugięć RoC i A_{UPP} (statystyka przedziałowa $P=95\%$ dla średniej; do obliczenia przedziałów ufności wykorzystano indywidualne odchylenia standardowe)

Następnie wyznaczono wybrane parametry geometrii czaszy ugięć (*SCI300*, *BDI600*, *BCI900*). Pomiary wykazały istotny wpływ zabiegu remontowego na wartości parametrów kształtu czaszy ugięć górnych, średnich i dolnych warstw konstrukcyjnych w porównaniu do stanu przed remontem. Największy wzrost trwałości stwierdzono w obrębie górnych warstw (zmniejszenie średniego wskaźnika *SCI300* o 63%), następnie w przypadku środkowych warstw (zmniejszenie średniego wskaźnika *BDI600* o 51%), a najmniejszy w przypadku dolnych warstw (zmniejszenie średniego wskaźnika *BCI900* o 34%). Dzieląc oceniane odcinki ze względu na typ konstrukcji zauważono, że w przypadku grupy nawierzchni podatnych (o podbudowie np. z mieszanki mineralno-asfaltowej, kruszywa niezwiązanego, 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 zmniejszyła się o 74%, a w przypadku konstrukcji półsztywnych – o 31%. Średnia wartość parametru *BDI600* w przypadku konstrukcji podatnych zmniejszyła się o 65%, zaś w przypadku konstrukcji półsztywnych o 15%. Średnia wartość parametru *BCI900* dla konstrukcji podatnych zmniejszyła się o 48%, a dla konstrukcji półsztywnych zmniejszyła się o 6%. Wyniki tej analizy ilustruje Rys. 4 i Tabl. 4.

Chosen deflection basin indices (*SCI300*, *BDI600*, *BCI900*) were determined as well. The measurements indicated a significant influence of rehabilitation works on the values of deflection basin indices representing the upper, middle and lower layers. The greatest increase in resistance was noted in the upper layers (a decrease in mean *SCI300* by 63%). Improvement was also noted in the middle layers (a decrease in mean *BDI600* by 51%) and the lower layers (a decrease in mean *BCI900* by 34%). When the analysed sections were divided according to the type of pavement, it was observable that the obtained improvement in the shape of the deflection basin was considerably greater for flexible pavements (with bases of e.g. asphalt mixture, unbound aggregate, paving stones), as opposed to semi-rigid pavements (with bases of e.g. concrete or lean concrete). Mean value of *SCI300* in the case of flexible structures decreased by 74%, and in the case of semi-rigid structures – by 31%. Mean value of *BDI600* in the case of flexible structures decreased by 65%, and in the case of semi-rigid structures – by 15%. Mean value of *BCI900* for flexible structures decreased by 48%, and for semi-rigid structures – by 6%. The results of the analysis are presented in Fig. 4 and Table 4.

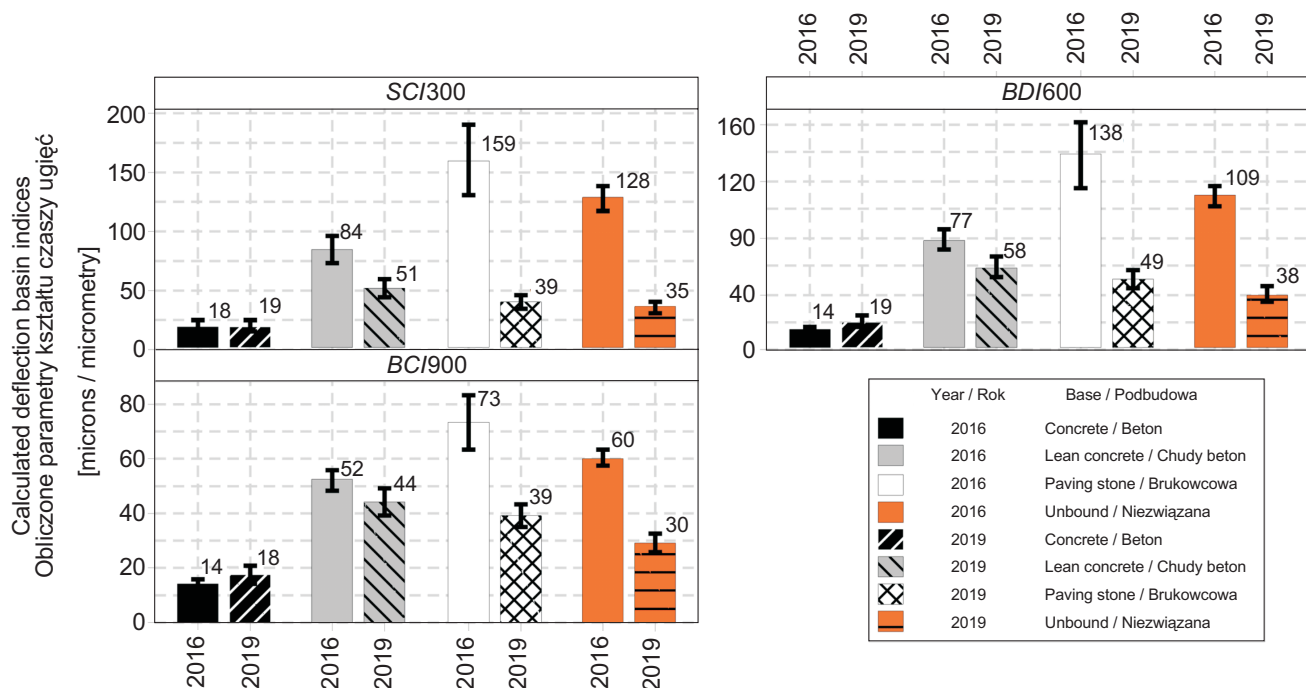


Fig. 4. Results of calculations of deflection basin indices *SCI300*, *BDI600* and *BCI900* (95% CI for the Mean)

Rys. 4. Wyniki obliczeń parametrów kształtu czaszy ugięć *SCI300*, *BDI600* i *BCI900* (statystyka przedziałowa $p=95\%$ dla średniej)

Table 4. Analysis of the results of calculations of deflection basin indices *SCI*300, *BDI*600 and *BCI*900
 Tablica 4. Analiza wyników obliczeń parametrów kształtu czaszy ugięć *SCI*300, *BDI*600 i *BCI*900

		Type of base / Rodzaj podbudowy			
		Concrete Betonowa	Lean concrete Chudy beton	Unbound Niezwiązana	Paving stone Brukowcowa
		Type of structure / Typ konstrukcji			
		Semi-rigid Półsztywna	Semi-rigid Półsztywna	Flexible Podatna	Flexible Podatna
Year / Rok	Parameter / Parametr	Mean values / Średnie wartości			
2016	<i>SCI</i> 300 [μm]	18	84	159	128
	<i>BDI</i> 600 [μm]	14	77	138	109
	<i>BCI</i> 900 [μm]	14	52	73	60
2019	<i>SCI</i> 300 [μm]	19	51	39	35
	<i>BDI</i> 600 [μm]	19	58	49	38
	<i>BCI</i> 900 [μm]	18	44	39	30
Analysis of change / Analiza zmian	Parameter / Parametr	Comparison / Porównanie			
According to the type of base Z uwagi na rodzaj podbudowy	<i>SCI</i> 300 [μm]	6% (0.760)*	-39% (0.000)	-75% (0.000)	-73% (0.000)
	<i>BDI</i> 600 [μm]	36% (0.034)	-25% (0.000)	-64% (0.000)	-65% (0.000)
	<i>BCI</i> 900 [μm]	29% (0.050)	-15% (0.007)	-47% (0.000)	-50% (0.000)
According to the type of structure Z uwagi na typ konstrukcji	<i>SCI</i> 300 [μm]	-31% (0.000)		-74% (0.000)	
	<i>BDI</i> 600 [μm]	-15% (0.006)		-65% (0.000)	
	<i>BCI</i> 900 [μm]	-6% (0.068)*		-48% (0.000)	
Total Globalnie	<i>SCI</i> 300 [μm]	-63% (0.000)			
	<i>BDI</i> 600 [μm]	-51% (0.000)			
	<i>BCI</i> 900 [μm]	-34% (0.000)			
The values in parentheses are the p-values from the Student's t-test for the difference of two mean values of independent samples; if p-value is less than 0.05, the null hypothesis may be rejected; values marked with * are statistically insignificant (the null hypothesis could not be rejected) Wartości w nawiasach przedstawiają wynik istotności testu t-Studenta dla różnic dwóch średnich prób niezależnych; istotność mniejsza niż 0,05 pozwala odrzucić hipotezę zerową o równości średnich; różnice oznaczone * są nieistotne statystycznie (nie można było odrzucić hipotezy zerowej)					

Zaobserwowane wyniki świadczą o tym, że wpływ zabiegu remontowego na parametry kształtu czaszy ugięć był istotny w przypadku nawierzchni o konstrukcji podatnej. Stwierdzono spadek ugięć znormalizowanych o ponad połowę, a zatem znacząco wzrosła nośność ocenianych konstrukcji. Zaobserwowano również ponad dwukrotny wzrost promienia czaszy ugięć, co świadczy o zaangażowaniu do współpracy większego obszaru nawierzchni dzięki zastosowaniu zbrojenia geosyntetycznego z siatki szklanej. Obserwację tę potwierdzają wyniki uzyskane już wcześniej na długoterminowym odcinku badawczym [17]. Istotną poprawę parametrów czaszy ugięć zaobserwowano w obrębie górnych, środkowych i dolnych stref konstrukcji.

W przypadku konstrukcji półsztywnych (podbudowa z betonu lub chudego betonu) uśredniony wpływ naprawy nie był tak duży jak w przypadku konstrukcji podatnych, a w niektórych

The observed results indicate that the influence of rehabilitation on deflection basin indices was significant in the case of flexible structures. Normalised deflections decreased by over 50%, therefore the bearing capacity of the evaluated structures increased considerably. It was also observed that the radius of curvature increased over two-fold, which indicated that a greater area of the pavement responded to loading, owing to the use of glass fibre grid reinforcement. This observation is in agreement with the results obtained previously on a long-term test section [17]. Significant improvement of deflection basin indices was observed in the upper, middle and lower zones of the structure.

In the case of semi-rigid pavements (bases of concrete or lean concrete), the average influence of rehabilitation was not as pronounced as for flexible pavements. In some

sytuacjach stwierdzono pogorszenie wskaźników stanu konstrukcji. Na podstawie szczegółowej analizy tego zagadnienia nasuwa się wniosek, że brak korzystnego wpływu naprawy stwierdzono w przypadku nawierzchni o podbudowie betonowej, natomiast istotną poprawę wskaźników czaszy ugięć zauważono w przypadku nawierzchni o podbudowach z chudego betonu. Może to wynikać z faktu, że zaobserwowano słaby stan podbudów z chudego betonu, charakteryzujących się występowaniem licznych spękań oraz degradacji strukturalnej (kruszenia). Można zatem wnioskować, że oceniane nawierzchnie o podbudowie z chudego betonu zachowywały się jak konstrukcje podatne. Kolejna obserwacja wykazała, że w przypadku nawierzchni półsztywnych średnie wartości ugięć przed zabiegami remontowymi były znacznie mniejsze niż w przypadku konstrukcji o podbudowie podatnej, a remont nie przyniósł tak dużej poprawy parametrów kształtu czaszy ugięć. Jednocześnie wskaźniki te były na bardzo dobrym poziomie, zarówno przed remontem jak i po nim. Zastosowanie geosyntetyków z siatki szklanej [17] lub stalowej [18] było przedmiotem innych analiz, które dla konstrukcji zbrojonej wykazały zwiększenie trwałości o kilka lat względem konstrukcji niezbrojonej.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Po 3 latach eksploatacji potwierdzono skuteczność przeprowadzonych prac remontowych na podstawie zmniejszenia średnich ugięć znormalizowanych D_{0norm} o 36%, zwiększenia średniego promienia czaszy ugięć RoC o 19% i zmniejszenia średniego pola powierzchni pod czaszą ugięć A_{UPP} o 57%. Wykazano, że średnia wartość wskaźnika $SCI300$ zmalała o 63%, wskaźnika $BDI600$ o 51%, zaś wskaźnika $BCI900$ o 34%.
2. Stwierdzono zdecydowanie większy wpływ zastosowanych technologii remontu na poprawę parametrów czaszy ugięć w przypadku nawierzchni podatnych niż w przypadku nawierzchni półsztywnych. Remonty nawierzchni spowodowały poprawę wskaźników kształtu czaszy ugięć warstw górnych oraz środkowych. Najmniejszy wpływ uzyskano w zakresie warstw dolnych.
3. W przypadku nawierzchni półsztywnych wpływ remontu na parametry geometrii czaszy ugięć był mniejszy niż w przypadku nawierzchni podatnych. Wpływ remontu na nawierzchnie o podbudowie betonowej był pomijalny i obniżał ogólną efektywność remontów w grupie nawierzchni półsztywnych, do której należały również nawierzchnie z podbudową z chudego betonu. Podbudowa z chudego betonu była w pogorszonym stanie, zatem

cases, a deterioration in the indices representing the condition of the structure was noted. Upon a more detailed analysis of the problem it is observable that no improvement occurred in the case of pavements with concrete base course, whereas pavements with base courses of lean concrete did exhibit a significant improvement in deflection basin indices. It may be related to the fact that lean concrete bases had been considerably distressed – they were characterised by numerous cracks and structural degradation (crumbling). Therefore, it may be concluded that the evaluated pavements with lean concrete bases functioned like flexible structures rather than semi-rigid structures. Another observation implied that in the case of semi-rigid pavements the mean values of deflections before rehabilitation works were considerably lower than in the case of flexible pavements, and their rehabilitation did not result in such a pronounced improvement in deflection basin indices. Nevertheless, the values of the indices were at a very good level, both before and after the rehabilitation. Application of glass fibre grid [17] or steel mesh grid [18] reinforcement was the subject of separate analysis, which showed that the service life of reinforced structures was extended by several years in comparison to unreinforced structures.

4. CONCLUSIONS

Based on the performed tests and analyses, the following conclusions were formulated:

1. The effectiveness of rehabilitation was confirmed after 3 years of service, based on a decrease in D_{0norm} by 36%, an increase in the mean radius of curvature by 19% and a decrease in the mean area under pavement profile A_{UPP} by 57%. It was shown that the mean values of the deflection basin indices decreased: $SCI300$ by 63%, $BDI600$ by 51%, and $BCI900$ by 34%.
2. It was noted that the effect of the applied rehabilitation on improvement of deflection basin parameters was markedly greater in the case of flexible pavements than in the case of semi-rigid pavements. Pavement rehabilitation led to improvement of deflection basin indices in the upper and middle zones of the structure. The least pronounced influence was noted in the lower layers.
3. In the case of semi-rigid pavements, the influence of rehabilitation was not as pronounced as for flexible pavements. The influence of rehabilitation on pavements with concrete bases was negligible and decreased the overall effectiveness of rehabilitation in the group of semi-rigid structures, which included also pavements with lean concrete bases. Since the bases of lean concrete were in deteriorated state,

prawdopodobnie konstrukcja nawierzchni przyjęła schemat podatny, co potwierdza zaobserwowana poprawa jej parametrów czaszy ugięć po remoncie, zbliżona do poprawy uzyskanej dla nawierzchni z grupy podatnych.

4. Przedstawiona ocena efektywności weekendowych remontów ulic Warszawy na podstawie parametrów czaszy ugięć była pozytywna. Remonty pozwoliły w krótkim czasie przywrócić nośność nawierzchni, zapewniając kilkuletnią prognozowaną trwałość. W kolejnym etapie analizy planowane jest przeprowadzenie obliczeń przy wykorzystaniu modułów sztywności z badań FWD i wyznaczenie prognozowanej trwałości dostępnymi metodami obliczeniowymi, np. metodami stochastycznymi [19].

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Sybilski D., Mechowski T., Sudyka J.*: Raport o stanie technicznym ulic Warszawy. IBDiM, Warszawa, 2003 (praca niepublikowana)
- [2] *Żółciak T.*: Oto prezydenci Warszawy, którzy najwięcej inwestowali. Analiza DGP, gazeta.pl, 2018, <https://gospodarka.dziennik.pl/news/artykuly/578955,warszawa-prezydent-inwestycje-gronkiewicz-waltz-lech-kaczynski-piskorski-kozak-marcinkiewicz-kochalski.html>, 29.07.2021
- [3] *Sybilski D., Stryk S.*: Zalecenia wykonywania cienkich warstw ściernych „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, Instrukcje, zeszyt 50, IBDiM, Warszawa, 1995
- [4] *Sybilski D., Pałys M., Mularzuk R., Bańkowski W.*: Zasady wykonywania nawierzchni asfaltowej o zwiększonej odporności na koleinowanie i zmęczenie (ZW-WMS 2002). Seria „I” - Informacje, Instrukcje, zeszyt 63, IBDiM, Warszawa, 2002
- [5] *Maliszewska D., Maliszewski M.*: Prediction of durability of Warsaw street pavements reconstruction carried out in 2004. Young Researcher Seminar, Brno, 2007
- [6] *Słowik M., Bartkowiak M.*: Review of analytical-empirical methods for determining stiffness moduli of asphalt mixtures. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **17**, 1, 2018, 5-22, DOI: 10.7409/rabdim.018.001
- [7] *Sybilski D.* i in.: Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDiM, Warszawa, 2001
- [8] *Maliszewski M., Maliszewska D., Sybilski D.*: Ocena skuteczności napraw weekendowych ulic m. st. Warszawy wraz z propozycją optymalizacji stosowanej technologii. IBDiM, Warszawa, 2010 (praca niepublikowana)
- [9] *Judycki J.* i in.: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2012
- [10] *Zofka A., Maliszewski M., Maliszewska D.*: Glass and carbon geogrid reinforcement of asphalt mixtures. Road Materials and Pavement Design, **18**, sup1, 2017, 471-490, DOI: 10.1080/14680629.2016.1266775
- the pavements probably started functioning in a manner similar to flexible pavements, as confirmed by the observed level of improvement in deflection basin parameters after rehabilitation – similar to the level of improvement noted for flexible structures.
4. The presented evaluation of the effectiveness of weekend rehabilitations of the streets of Warsaw based on deflection basin parameters was positive. The measures taken enabled quick restoration of bearing capacity, ensuring an extension of forecasted service life by several years. Future stages of the analyses will encompass calculations based on the stiffness moduli obtained from FWD tests and determination of the forecasted service life using the available calculation methods, e.g. stochastic methods [19].
- [11] *Mieczkowski P., Majer S., Budziński B.*: Przebudowa dróg o nawierzchni betonowej na przykładzie dróg wojewódzkich nr 102 i 142. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **18**, 1, 2019, 25-38, DOI:10.7409/rabdim.019.002
- [12] *Judycki J.* i in.: Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2014
- [13] *Ryś D., Jaskuła P., Jaczewski M., Pszczoła M.*: Application and evaluation of M-EPDG for performance analysis of Polish typical flexible and rigid pavements. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **18**, 4, 2019, 283-302, DOI: 10.7409/rabdim.019.019
- [14] *Sybilski D., Bańkowski W., Maliszewski M., Maliszewska D., Zofka A.*: Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. IBDiM, Warszawa, 2014
- [15] *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
- [16] *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, 1-14
- [17] *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
- [18] *Zieliński P.*: Effectiveness of the steel mesh track in repairing asphalt pavements in Małopolska region. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **356**, 2018, 012017
- [19] *Batrakova A.G., Troyanovsky V.V., Batrakov D.O., Pilicheva M.O., Skrypnik N.S.*: Prediction of the road pavement condition index using stochastic models. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **19**, 3, 2020, 225-242, DOI:10.7409/rabdim.020.015