

# Ocena wskaźnikowa stanu technicznego konstrukcji nawierzchni jezdni – studium przypadku na poziomie projektu



JAKUB RASZEWSKI

GDDKiA  
Oddział w Poznaniu  
jraszewski@gddkia.gov.pl



ANDRZEJ POŻARYCKI

Politechnika Poznańska  
andrzej.pozarycki@put.  
poznan.pl  
ORCID: 0000-0002-1321-066X



PRZEMYSŁAW GÓRNAŚ

Politechnika Poznańska  
przemyslaw.gornas@put.  
poznan.pl  
ORCID: 0000-0002-0632-4191

Konieczność rozpoznania przyczyn degradacji konstrukcji nawierzchni wymusiła na Zarządcach Dróg wprowadzanie zautomatyzowanych technik diagnostycznych. W Polsce od początku lat 90 na drogach krajowych rozwijany był system SOSN (System Oceny Stanu Nawierzchni). W pierwszych latach ocena dokonywana była wizualnie. Wykonywano ją ręcznie równocześnie z pomiarem głębokości kolein. Pomiar polegał na inwentaryzacji hektometra miarodajnego wybranego z odcinka spisowego. Rejestracji podlegał zakres oraz określana szkodliwość uszkodzeń w 3-stopniowej skali. Zakres mierzono kółkiem pomiarowym, a wyniki inwentaryzacji notowano w formularzu. W 1998 r. przeprowadzono pierwsze próby systemu umożliwiającego prowadzenie półautomatycznej oceny wizualnej uszkodzeń nawierzchni w sposób ciągły. Inwentaryzacja uszkodzeń była wykonywana przez operatorów z samochodu poruszającego się z niewielką prędkością.

Zaobserwowane uszkodzenia wprowadzane były do rejestratora połączonego z licznikiem dystansu. Na drogach klasy A, S i na odcinkach o dużym natężeniu ruchu ocena była realizowana za pomocą wideorejestracji z wykorzystaniem urządzenia SOWA-3. System łączył zalety klasycznej oceny wizualnej i bezpieczeństwa realizacji. W jego skład wchodziła kamera zaopatrzona w szerokokątny obiektyw, umocowana na wysokości około 2,3 m nad ziemią oraz licznik dystansu zespolony z kołem samochodu, wykorzystywany do pomiaru przejechanego dystansu. Oś optyczna kamery odchylona była od pionu, co pozwalało na rejestrowanie pasa ruchu o szerokości do 4 m. Pomiar odbywał się w potoku ruchu z prędkością do 70 km/h, co w znacznym stopniu zapewniało bezpieczeństwo operatorom. Aktualnie do identyfikacji i oceny uszkodzeń powierzchni nawierzchni wykorzystywane są systemy pomiarowe LCMS.

Kolejnym badaniem był pomiar głębokości kolein początkowo wykonywany metodą „łaty 2-metrowej i klina mierniczego”. Wykonywano pięć pomiarów na hektometrze miarodajnym w koleinie najbliższej zewnętrznej krawędzi jezdni.

Z czasem wprowadzono pomiary automatyczne. Pierwszym urządzeniem wykorzystywanym w pomiarach był koleinomierz mechaniczny. Obecnie do pomiaru głębokości kolein wykorzystywane są najnowsze urządzenia wyposażone w czujniki laserowe oraz ultradźwiękowe. Należą do nich m.in. profilografy laserowe LPR i RSP [16].

Dynamika postępu technologicznego w zakresie diagnostyki stanu nawierzchni drogowych wymuszała dostosowanie dotychczas obowiązujących uwarunkowań do aktualnych potrzeb. W roku 2012 Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad wdrożyła system DSN (Diagnostykę Stanu Nawierzchni), który zastąpił stosowany system SOSN. Uaktualnienie wprowadzonych wytycznych stosowania nastąpiło w 2015 roku, a głównymi przyczynami tych zmian był rozwój narzędzi wspomagających automatyzację pomiarów oraz doświadczenia zagraniczne w tym zakresie [11].

Kolejna aktualizacja wytycznych stosowania nastąpiła w 2019 roku. Obowiązujące wymagania uwzględniają m.in.:

- wykorzystanie podstawowych założeń dotyczących organizacji kampanii pomiarowej z pracy naukowo-badawczej DSN [12],
- zachowanie spójności w analizach danych z dotychczas stosowanymi zasadami w celu zapewnienia ciągłości wnioskowania,
- uszczegółowienie procesów realizacji kampanii pomiarowej DSN oraz dotychczas stosowane zasady określone w różnych dokumentach, m.in. instrukcjach, komentarzach, pismach dotyczących realizacji kampanii pomiarowej na sieci dróg krajowych.

Informacje o stanie technicznym nawierzchni drogowych są podstawowymi, jakie wykorzystuje administracja drogowa w procesie zarządzania eksploatacją dróg. Jakość tych danych, ich dokładność, kompletność i aktualność wpływają na decyzje związane z utrzymaniem i eksploatacją dróg. Informacje te są pozyskiwane w ramach corocznych kampanii DSN prowadzonych przez laboratoria drogowe GDDKiA na drogach krajowych [11]. Analizy można prowadzić na poziomie kraju, na poziomie oddziałów GDDKiA oraz na dowolnie wybranych odcinkach dróg krajowych np. sieci TEN-T czy drogach międzynarodowych [11].

Od kiedy zaczęto korzystać z urządzeń do badań nieniszczących pojawiło się wiele teorii oraz programów komputerowych opisujących i próbujących ze sobą powiązać parametry nawierzchni. Jednym z nich, od dawna analizowanym pod kątem oceny stanu technicznego konstrukcji nawierzchni, jest czasza ugięcia, a konkretnie jej przekrój podłużny, który stanowi linię przemieszczeń pionowych. Powszechnie używane parametry, dla których wartości uzyskiwane są za pośrednictwem analizy właściwości czaszy ugięcia na pod-

stawie wyników z urządzeń typu FWD (ang. *Falling Weight Deflectometer*), są przedstawione w tabeli 1 [9].

Tabela 1. Powszechnie używane parametry czasy ugięcia (źródło: [5])

Parametr czasy ugięcia	Parametr	Jednostka
Wskaźnik krzywizny powierzchni, <b>SCI</b>	$SCI = d_0 - d_{300}$ , $SCI = d_0 - d_r$ <i>r</i> przeważnie [450, 600]	μm, mm
Wskaźnik uszkodzeń podbudowy, <b>BDI</b>	$BDI = d_{300} - d_{600}$	μm, mm
Wskaźnik krzywizny podbudowy, <b>BCI</b>	$BCI = d_{600} - d_{900}$ (USA) $BCI = d_{900} - d_{1200}$ (Finlandia) $BCI = d_{1200} - d_{1500}$ (Estonia)	μm, mm
Powierzchnia	$AREA = \frac{6(D_0 + 2D_1 + 2D_2 + D_3)}{d_0}$	-
	$AREA = \frac{150(d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900})}{D_0}$	
Powierzchnia pod profilem nawierzchni	$AUPP = \frac{5d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900}}{d_0}$	mm
Współczynnik kształtu	$F_1 = \frac{d_0 - d_{600}}{d_{300}}$ ; $F_2 = \frac{d_{300} - d_{900}}{d_{600}}$	-
Współczynnik ugięcia	$DR = \frac{d_{600}}{d_0}$	-

W tym artykule analiza wyników badań koncentruje się na trzech podstawowych parametrach czasy ugięć [9], a mianowicie:

- **SCI**, *Surface Curvature Index* (wskaźnik krzywizny powierzchni) – jest to różnica między wartościami przemieszczeń pionowych oznaczanych za pośrednictwem geofonów umieszczonych w osi obciążenia ( $d_0$ ) oraz w odległości 300 mm od osi obciążenia ( $d_{300}$ ):  $SCI = d_0 - d_{300}$ , który w analizach wykorzystuje się do

oceny stanu technicznego tzw. „górnego strefy” przekroju poprzecznego nawierzchni. W przypadku nawierzchni podatnych wartość wskaźnika *SCI* wykorzystywana jest do oceny warstw bitumicznych [9].

- **BDI**, *Base Damage Index* (wskaźnik uszkodzeń podbudowy) – jest to różnica między wartościami przemieszczeń pionowych oznaczanych za pośrednictwem geofonów umieszczonych w odległości 300 mm ( $d_{300}$ ) i 600 mm ( $d_{600}$ ) od osi obciążenia:  $BDI = d_{300} - d_{600}$ . W literaturze wartość wskaźnika wykorzystywana jest do oceny stanu technicznego warstw podbudowy, tzw. strefy „środkowej” przekroju poprzecznego nawierzchni [9].
- **BCI**, *Base Curvature Index* (wskaźnik krzywizny podbudowy) – jest to różnica między wartościami przemieszczeń pionowych oznaczanych za pośrednictwem geofonów umieszczonych w odległości 1200 mm ( $d_{1200}$ ) i 1500 mm ( $d_{1500}$ ):  $BCI = d_{1200} - d_{1500}$ . W literaturze wartość wskaźnika wykorzystywana jest do oceny stanu technicznego podłoża nawierzchni jezdni, tzw. strefy „dolnej” przekroju poprzecznego nawierzchni [9].

Zarówno dane terenowe, jak i obliczone syntetyczne wartości ugięć były już wcześniej opisywane w literaturze w kontekście identyfikacji wartości wskaźników uszkodzeń na podstawie czasy ugięć oznaczanych na powierzchni jezdni (ang. *DBPs – Deflection Basin Parameters*). Jedną z szerzej stosowanych wielkości w praktyce są tzw. moduły powierzchniowe (*surface modulus* [19]). Zależności między ich wartościami są analizowane razem z cechami strukturalnymi nawierzchni, a za najbardziej obiecującą metodę oceny tych nieliniowych zależności należy uznać modele z rodziny sztucznych sieci neuronowych (ang. *ANNs – Artificial Neural Networks*). Powszechnie znane i przytaczane w literaturze parametry obliczane na podstawie czasy ugięć nawierzchni jezdni zostały zestawione w tabeli 2 [2].

Tabela 2. Zestawienie najczęściej spotykanych parametrów krzywej ugięć nawierzchni (źródło: [6])

Nazwa parametru	Parametr	Źródło wyników	Autor pomysłu
Powierzchnia	$AREA = \frac{6(D_0 + 2D_1 + 2D_2 + D_3)}{d_0}$	FWD	Hoffman 1981
Powierzchnia cząstkowa	$AREA_2 = \frac{6(D_{12} + 2D_{18} + D_{24})}{D_0}$	FWD	
	$AREA_3 = \frac{6(D_{24} + 2D_{36} + D_{48})}{D_0}$		
Wskaźniki powierzchni	$AI_1 = \frac{D_0 + D_{12}}{2D_0}$ $AI_2 = \frac{D_{12} + D_{24}}{2D_0}$ $AI_3 = \frac{D_{24} + D_{36}}{2D_0}$ $AI_4 = \frac{D_{36} + D_{48}}{D_0}$	FWD	
Powierzchnia pod profilem nawierzchni	$AUPP = \frac{5d_0 + 2d_{300} + 2d_{600} + d_{900}}{d_0}$	FWD	Hill & Thompson
Wskaźnik krzywizny ugięć na podbudowie	$BCI = D_{60} - D_{45}$ lub $BCI = D_{24} - D_{36}$	Dynaflect FWD	Peterson 1972

Nazwa parametru	Parametr	Źródło wyników	Autor pomysłu
Wskaźnik uszkodzeń podbudowy	$BDI = D_{12} - D_{24}$	RR&FWD	
Wskaźnik zginania	$BI = D_0/a$	BB	Hveem 1945
Iloraz ugięć	$DR = D_r/D_0$	FWD	Classen 1976
Wskaźnik wpływu obciążenia	$LSI = (D_{48}/D_{24}) \times F$	FWD	Wimsatt 1995
Wartość maksymalna ugięcia	$D_0$	BB Dynalect	Shrivner 1968
Promień krzywizny	$R = \frac{r^2 *}{\left(2D_0 \left(\frac{D_0}{D_r} - 1\right)\right)}$	CM&BB	Dehlen 1962
Promień wpływu	$RI = x/D_0$	BB	Ford 1962
Współczynnik kształtu	$F_1 = \frac{(d_0 - d_{24})}{d_{12}}; F_2 = \frac{(d_{12} - d_{36})}{d_{24}}$	FWD	Hoffman 1981
Współczynnik kształtu	$F_3 = \frac{(d_{24} - d_{48})}{d_{36}}$	FWD	
Wskaźnik nachylenia	$SD = \tan^{-1} [(D_0 - D_r) / r]$	BB	Kung 1967
Wskaźnik wpływu	$S = \frac{25(D_0 + D_{12} + D_{24} + D_{36})}{D_0}$	Dynalect RR FWD	Vaswani 1971
Wskaźnik wytrzymałości	$SSI = A_x / (X_{min} \times E_{min})$	FWD	Jung 1992
Wskaźnik spójności	$SH = A_x / (X_s \times E_m)$	FWD	Jung 1992
Wskaźnik krzywizny linii ugięć na powierzchni warstwy	$SCI = D_0 - D_{12}$	BBRRDynalect FWD	Shriver 1968
Nachylenie stycznej	$TS = (D_0 - d_x) / x$	FWD	Stock 1948

#### Legenda [6]:

- $D_r$  – wartość ugięcia oznaczona na powierzchni warstwy,
- $R$  – dystans między miejscami oznaczenia wartości ugięcia na powierzchni, a osią obciążenia,
- $A$  – ¼ długości krzywej ugięć nazywanej „czaszą”,
- $X$  – odległość od miejsca, w którym wartość ugięcia jest największa do punktu styczności,
- $D$  – wartość ugięcia w punkcie styczności,
- $F$  – minimalna wartość z  $D_{12}/D_0$ ,  $D_{24}/D_{12}$ , ..., lub  $D_{72}/D_{60}$ ,
- $A_x$  – powierzchnia pod krzywą opisującą funkcję tzw. „modułu powierzchniowego”,
- $E_m$  – szacowana wartość modułu podbudowy,
- $X_s$  – długość promienia dla układu osiowo-symetrycznego,
- BB – analiza na podstawie wyników z pomiarów belka Benkelmana,
- RR – analiza na podstawie wyników z pomiarów urządzeniem ang. Road Rater,
- FWD – analiza na podstawie wyników z pomiarów urządzeniem typu FWD,
- CM – analiza na podstawie wyników z pomiarów krzywiznomierzem,
- \* –  $r = 127$  mm.

### Przykłady dostępnych narzędzi do analizy przekrojów czaszy ugięć konstrukcji nawierzchni

#### Oprogramowanie APLCAP (Asphalt Pavement Layer Condition Assessment Program)

Mając do dyspozycji parametry przekroju czaszy ugięcia autorzy prac, między innymi takich jak [10], opracowali program komputerowy APLCAP (Asphalt Pavement Layer Condition Assessment Program), w którym wiedza na temat wskaźników i ich wzajemnych relacji została wykorzystana do przewidywania stanu technicznego nawierzchni

jezdni. Na wartości tych wskaźników mają wpływ nie tylko odpowiadające im właściwości materiałowe warstw, ale także właściwości strukturalne nawierzchni jezdni, warunki środowiskowe takie jak temperatura i wilgotność oraz warunki gruntowo-wodne. Dla przykładu, duże wartości odkształcenia wywołanego ściskaniem w warstwie podłoża nawierzchni jezdni mogą być skutkiem zarówno małej wytrzymałości podłoża, jak i niewielkiej grubości warstwy z betonu asfaltowego czy małej wartości modułu sprężystości betonu asfaltowego wynikającej z wysokich temperatur. Dane wyjściowe APLCAP zawierają wartości wskaźników stanu technicznego, dla których przyjęto kryteria przedstawiane w postaci zmiennych lingwistycznych (czyli takich, które określają stan techniczny przy użyciu słów np. dobry, średni, zadowalający czy zły), opisując stan techniczny nawierzchni w postaci: a) nawierzchnia nienaruszona, nieco lub poważnie uszkodzona dla warstwy betonu asfaltowego i b) słaba, przeciętna lub mocna dla warstw podbudowy oraz podłoża gruntowego [10].

Po przeanalizowaniu otrzymanych wyników, autorzy programu komputerowego podkreślają, że APLCAP wprowadza nową, zintegrowaną procedurę oceny stanu technicznego warstw nawierzchni asfaltowych, w której został zawarty dynamiczny efekt obciążenia urządzeniem typu FWD oraz nieliniowa charakterystyka warstw niezwiązanych. We wnioskach końcowych zapisano [10]:

1. Prognozowane wartości modułów sprężystości betonu asfaltowego przy użyciu algorytmów APLCAP są nieco większe niż te utworzone za pomocą referencyjnego oprogramowania komputerowego znanego jako Modulus 5.1, bazującego na liniowej analizie statycznej.



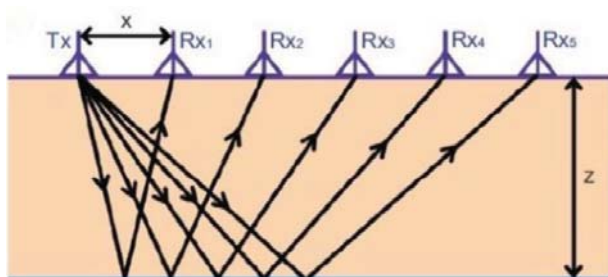
2. Wartości modułów sprężystości warstw z betonu asfaltowego, obliczone za pośrednictwem algorytmów komputerowych APLCAP wykazują o wiele silniejszą korelację w połączeniu ze zmierzonymi wartościami temperatury na średniej głębokości w przekroju nawierzchni niż te utworzone za pomocą oprogramowania referencyjnego Modulus 5.1.
3. Krytyczne wartości odkształceń warstw nawierzchni jezdni, obliczone za pośrednictwem algorytmów komputerowych APLCAP wykazują silną korelację do zmierzonych wartości odkształceń w nawierzchniach opisywanych w badaniach CRREL i RTM. Wyjątkiem okazują się wartości odkształceń ściskających powierzchni warstwy podbudowy z kruszyw mineralnych.
4. Na ogół stan techniczny warstw podbudowy oraz podłoża dla jednej z badanych nawierzchni (oznaczonej symbolem US 264), wyrażony prognozowaną wartością obliczoną za pomocą algorytmów APLCAP jest zgodny z oceną dokonaną na podstawie wyników przy użyciu metody sondy dynamicznej DCP (ang. *Dynamic Cone Penetrometer*).

### Technologia ZiSPON – Zintegrowany System Precyzyjnej Oceny Nawierzchni

Urządzenie zostało opracowane na Politechnice Poznańskiej przy współpracy z firmą HAX w ramach programu NCBiR (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju) Program Badań Stosowanych PBS3/B6/38/2015. Projekt nosił tytuł: *Precyzyjny system identyfikacji parametrów konstrukcji jezdni w prognozowaniu czasu życia nawierzchni drogowych*.



Rys. 1. Urządzenie ZiSPON: widok ogólny oraz widok ramy pomiarowej (źródło: [15])



Rys. 2. Ilustracja graficzna metody profilowania wielokanałowego – schemat koncepcji pomiaru (źródło: [3])

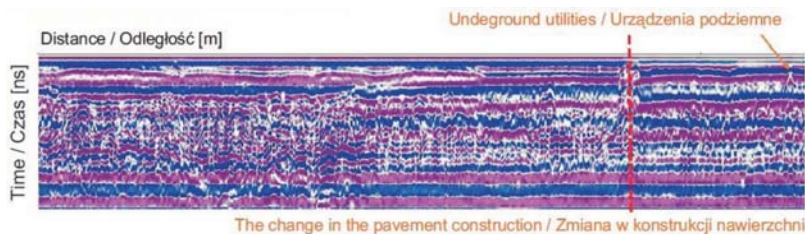
Urządzenie jest systemem eksperckim, na które składają się następujące moduły pomiarowe:

- Moduł UGN – moduły FWD/HWD (ang. *Falling Weight Deflectometr / Heavy Weight Deflectometr*) do oznaczania ugięć nawierzchni w dwóch wzajemnie prostopadłych do siebie kierunkach. Obciążenie w zakresie od 10 do 300 kN. Dziewięć geofonów ustawionych równolegle względem podłużnej osi pomiarowej. Sześć geofonów zlokalizowanych wzdłuż poprzecznej osi pomiarowej [17].
- Moduł BIG – wykonany na potrzeby wspierania Bezinwazyjnej Identyfikacji Grubości, rodzaju i liczby warstw nawierzchni w oparciu o krzywą dyspersji. Moduł w założeniach stanowi rozszerzenie potencjału metod znanych na świecie jako SPA (ang. *Seismic Pavement Analysis*). Rozmieszczenie akceleratorów przedstawiono na rys. 2 [17].
- Moduł CAP – moduł do wyznaczania nośności doraźnej nawierzchni jezdni, którego nazwa wywodzi się z języka angielskiego *ad hoc pavement CAPacity*.
- Moduł ZM – moduł do badań zmęczeniowych nawierzchni jezdni i oceny trwałości zmęczeniowej układów warstwowych, określane też mianem FAT (ang. *Fatigue*).
- Moduł GPR (ang. *Ground Penetrating Radar*) – realizuje pomiary metodą profilowania wielokanałowego. Pomiar jest oparty na generatorze impulsów fali elektromagnetycznej o częstotliwości 1500 MHz w kształcie tzw. *Mexicanhat* (antena nadawcza, transmitter Tx) i anteny odbiorczej (receiverRx) [17].

Dodatkowo urządzenie zostało wyposażone w uzupełniające systemy pomiarowe takie jak geolokalizacja, pomiar temperatury i fotorejestracja.

- Moduł geolokalizacji – moduł danych, które w części informatycznej są wykorzystywane do ustalania lokalizacji pomiarów na podstawie algorytmu, w którym integruje się wyniki enkodera z wynikami technologii pozycjonowania geograficznego GPS. Integracja jest konieczna, ze względu na możliwość częściowej utraty sygnału GPS [18].

- Moduł thermo – bazę danych w tym module uzupełniają wykorzystując [18]:
  - termometr do pomiaru temperatury otoczenia (umieszczony około 1 metr nad powierzchnią nawierzchni),
  - pirometr do oznaczania temperatury powierzchni warstwy wierzchniej nawierzchni,
  - termopara wykorzystywana do pomiaru temperatury w połowie grubości warstw bitumicznych nawierzchni (konieczne jest uprzednie nawiercenie otworu).
- Moduł photo – moduł rejestracji ortogonalnego obrazu cyfrowego nawierzchni w miejscu przyłożenia obciąże-



Rys. 3. Przykładowa postać echogramu uzyskanego z prześwietleń nawierzchni georadarem jednej z typowych nawierzchni podatnych (źródło: [3])

nia. Obejmuje obszar o wymiarach  $\pm 50$  cm szerokości względem osi usytuowania geofonów równoległej do osi pojazdu ZiSPON i 4 metry długości [18].

Elementem, który łączy te wszystkie moduły jest moduł informatyczno-analityczny technologii ZiSPON, którego podstawą są algorytmy sztucznej inteligencji, stąd nazwa SSN (obliczeniowy moduł sztucznych sieci neuronowych).

Wewnątrz urządzenia znajduje się układ hydrauliczny. Układ geofonów (przetworników prędkości rozchodzenia się fal mechanicznych w ośrodku) w czasie pomiarów odpowiada (znak minus oznacza symetryczne usytuowanie geofonu względem osi obciążenia w odniesieniu do obu wzajemnie prostopadłych osi belek pomiarowych):

- typowemu usytuowaniu na belce podłużnej czujników przyjmowanych w Polsce dla nawierzchni bitumicznych (-600, -300, 0, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 mm) -> 9 przetworników typu geofon,
- usytuowaniu geofonów na belce prostopadłej do kierunku ruchu. W tym przypadku obowiązuje następujący rozstaw geofonów (od lewej do prawej) -900, -600, -300, 0, 300, 600 mm -> 6 przetworników typu geofon,

co w sumie składa się na 14 przetworników. Sposób przyłożenia obciążenia również odpowiada standardom stosowanym w Polsce (obciążenie równomiernie rozłożone na powierzchnię w kształcie koła o promieniu  $r = 150$  mm). Pomimo zainstalowanej na samochodzie zaawansowanej technologii, system z punktu widzenia operatora wygląda prosto i jest intuicyjny w obsłudze za pomocą dotykowego ekranu zainstalowanego w części pasażerskiej pojazdu. Dodatkowo przestrzeń pasażerska wyposażona jest w kamery, dzięki którym operator ma ciągły podgląd na urządzenia znajdujące się w pojeździe oraz przed nim i za nim.

## Studium przypadku – analiza wskaźnikowa w technologii ZiSPON

Do analizy oceny stanu technicznego nawierzchni wybrano ok. 45 metrowy odcinek doświadczalny, na którym odnotowano kilku centymetrowe pionowe wartości przemieszczeń nawierzchni jezdni na obu pasach ruchu (rys. 4). Studium przypadku obejmuje wybrane aspekty analizy, które stanowią podstawę do sformułowania najbardziej prawdopodobnej przyczyny tego zjawiska. Zakres prac obejmował:

- badania ugięć nawierzchni jezdni urządzeniem ZiSPON,

- analizę wyników badań ugięć nawierzchni jezdni – oceny wskaźnikowe,
- zestawienie zbiorcze wyników analizy wyników badań,
- podsumowanie i sformułowanie wniosków.

Zastosowano metodę pomiaru przy użyciu ugięciomierza dynamicznego typu FWD. Do pomiarów ugięć nawierzchni jezdni wykorzystano urządzenie pomiarowe ZiSPON i moduł UGN. Pośrednim wynikiem pomiarów ugięć nawierzchni jezdni były rejestrowane w funkcji czasu, wartości obciążenia i przemieszczeń oznaczane na powierzchni nawierzchni.

Dla uzyskanych wartości maksymalnych ugięć nawierzchni wyznaczono zarówno wielkości miarodajne, jak i obliczeniowe, które wykorzystano do oceny nośności nawierzchni badanego odcinka. Obciążenie nawierzchni było wymuszane za pośrednictwem układu hydraulicznego i płyty stalowej ogumionej. Przy pomiarach ugięć nawierzchni jezdni podatnych należy wziąć pod uwagę, że sztywność warstw asfaltowych zmienia się wraz ze zmianą ich temperatury. Na potrzeby pomiarów wykorzystano sondę typu K, umieszczoną w połowie grubości, określonej dla wszystkich warstw asfaltowych w przekroju poprzecznym nawierzchni jezdni.

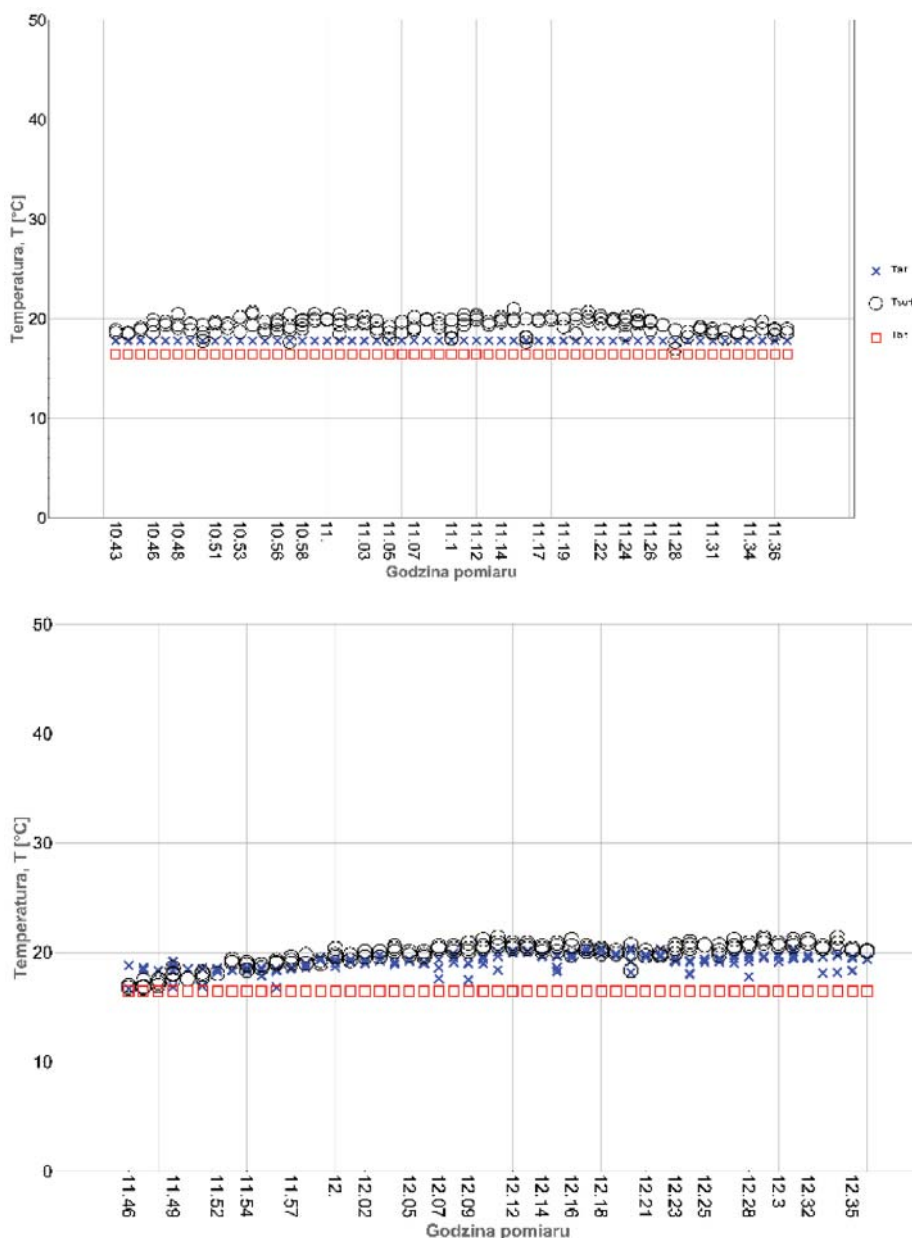


Rys. 4. Zakres badania ugięć nawierzchni jezdni na odcinku doświadczalnym, pokazany na tle zakresu pomiaru przemieszczeń metodami geodezyjnymi



Rys. 5. Lokalizacja miejsca, w którym zmierzona została temperatura w połowie łącznej grubości określonej dla wszystkich warstw asfaltowych w przekroju poprzecznym warstw nawierzchni jezdni





Rys. 6. Wykresy przedstawiające wartości temperatur, które odnotowano podczas badań

### Wskaźniki linii przemieszczeń

Analizie poddano wartości wybranych wskaźników linii przemieszczeń uzyskanej z analizy pomiarów ugięć nawierzchni jezdni wykonanych urządzeniem ZiSPON.

W pierwszym etapie pomierzone wartości ugięć dla wszystkich czujników urządzenia ZiSPON (9 geofonów umieszczonych na belce podłużnej ugięciomierza) poddano normalizacji amplitudowej do 50 kN [1], wykorzystując wzór:

$$U_{norm}(F_2) = \frac{F_2}{F_1} \times U_{test}(F_1) \quad (1)$$

w którym:

$F_2$  – obciążenie, któremu odpowiada znormalizowana wartość ugięcia  $U_{norm}(F_2)$ ,

$F_1$  – maksymalna zarejestrowana wartość obciążenia w trakcie pomiaru, dla którego wartość ugięcia jest znana  $U_{test}(F_1)$ .

W drugim etapie przywołano postacie matematyczne wielkości  $BCI$ ,  $BDI$  oraz  $SCI$ . Wykorzystano do tego pomiary ugięć nawierzchni z kilku geofonów, co umożliwiło obliczenie wartości wskaźników  $BCI$ ,  $BDI$  oraz  $SCI$  za pomocą wzorów:

- wskaźnik  $BCI$

$$BCI_{adjusted} = d_{60} - d_{90} \quad (2)$$

w którym:

$BCI_{adjusted}$  – wskaźnik krzywizny podbudowy,

$d_{60}$  – wartość ugięcia w odległości 60 cm od osi obciążenia,

$d_{90}$  – wartość ugięcia w odległości 90 cm od osi obciążenia.

Na podstawie wartości wskaźnika  $BCI$  można wyróżnić lokalizację miejsc, w których podłoże nawierzchni jezdni może cechować się niewystarczającą nośnością. Obliczenia wykonano dla znormalizowanych wartości ugięć (dla temperatury referencyjnej równej 20°C).

- wskaźnik  $BDI$

$$BDI_{adjusted} = d_{30} - d_{60} \quad (3)$$

w którym:

$BDI_{adjusted}$  – wskaźnik uszkodzeń podbudowy,

$d_{30}$  – wartość ugięcia w odległości 30 cm od osi obciążenia,

$d_{60}$  – wartość ugięcia w odległości 60 cm od osi obciążenia.

Na podstawie wartości wskaźnika  $BDI$  można było wyróżnić lokalizację miejsc, w których podbudowa nawierzchni jezdni może cechować się właściwościami, które z inżynierskiego punktu widzenia określamy jako niezadowolające czy złe.

- wskaźnik  $SCI$

$$SCI = d_0 - d_{30} \quad (4)$$

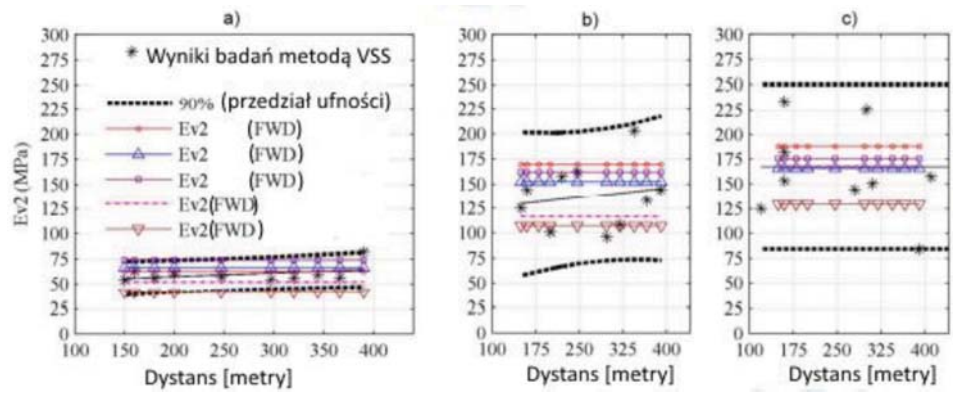
w którym:

$SCI$  – wskaźnik krzywizny powierzchni,

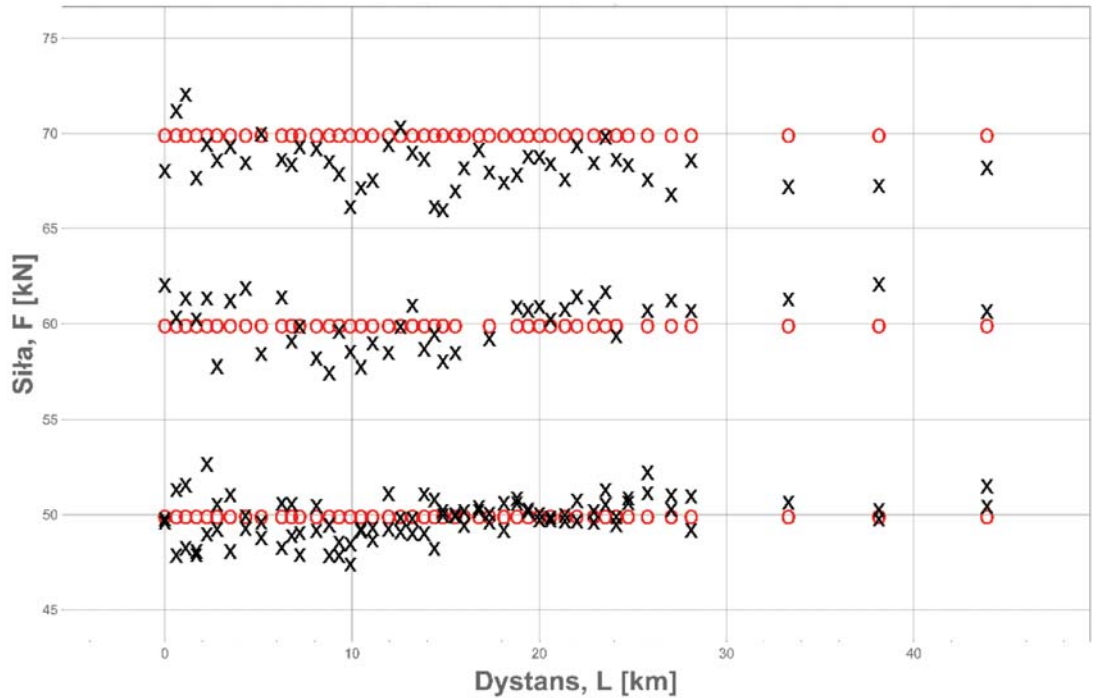
$d_0$  – wartość ugięcia w odległości 0 cm od osi obciążenia,

$d_{30}$  – wartość ugięcia w odległości 30 cm od osi obciążenia.

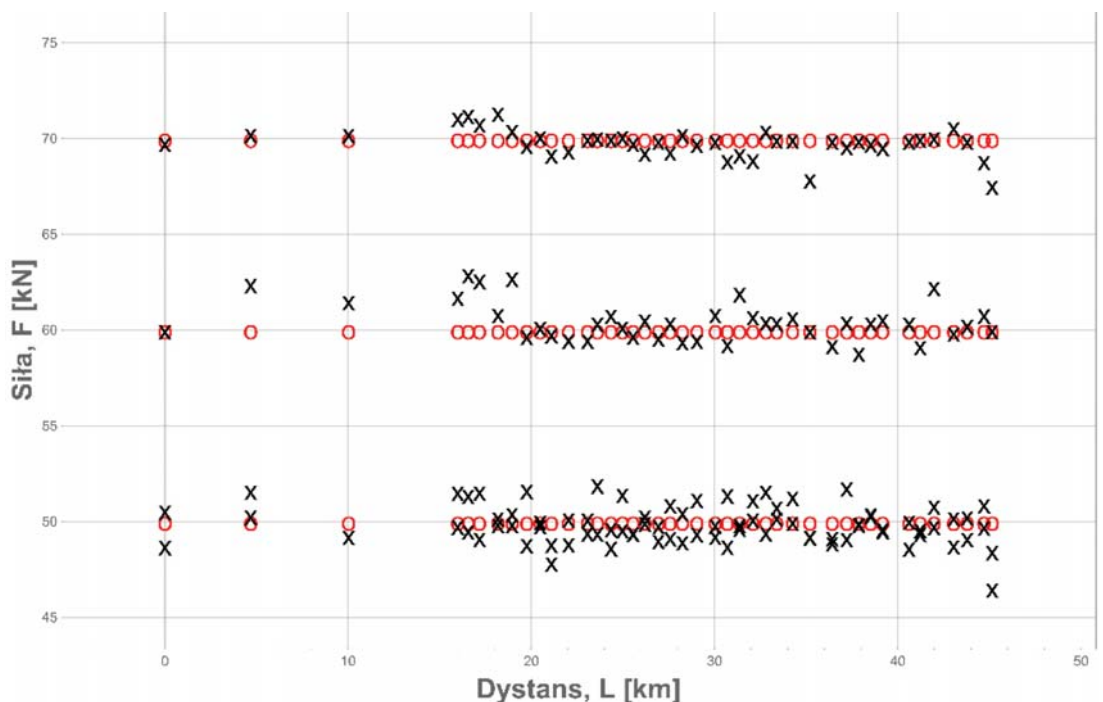
Rys. 7. Wyniki analizy pomiarów urządzeniami typu VSS oraz FWD na: a) powierzchni warstwy ulepszonego podłoża (warstwy stabilizowanej cementem o grubości 15 cm), b) powierzchni warstwy z kruszyw łamanych o grubości 40 cm, c) powierzchni warstwy z kruszyw łamanych o grubości 60 cm (źródło: [7])



Rys. 8. Pas ruchu dla kierunku jazdy w stronę ronda: a) znaczniki oznaczone czerwonymi symbolami w kształcie okręgów oznaczają wartości obciążeń zadeklarowane przez laboranta w czasie, gdy wykonywane były pomiary ugięć nawierzchni pasa ruchu; b) znaczniki oznaczone czarnymi symbolami w kształcie litery x, oznaczają wartości reakcji nawierzchni na zadeklarowane przez laboranta obciążenia



Rys. 9. Pas ruchu dla kierunku jazdy w stronę obiektu mostowego: a) znaczniki oznaczone czerwonymi symbolami w kształcie okręgów oznaczają wartości obciążeń zadeklarowane przez laboranta w czasie, gdy wykonywane były pomiary ugięć nawierzchni pasa ruchu; b) znaczniki oznaczone czarnymi symbolami w kształcie litery x oznaczają wartości reakcji nawierzchni na zadeklarowane przez laboranta obciążenia



Na podstawie wartości wskaźnika SCI można wyróżnić lokalizację miejsc, w których warstwy bitumiczne (wszystkie, które występują w przekroju) są w złym stanie technicznym (zaburzenia ciągłości w postaci spękań).

### Wtórny moduł odkształcenia podłoża nawierzchni

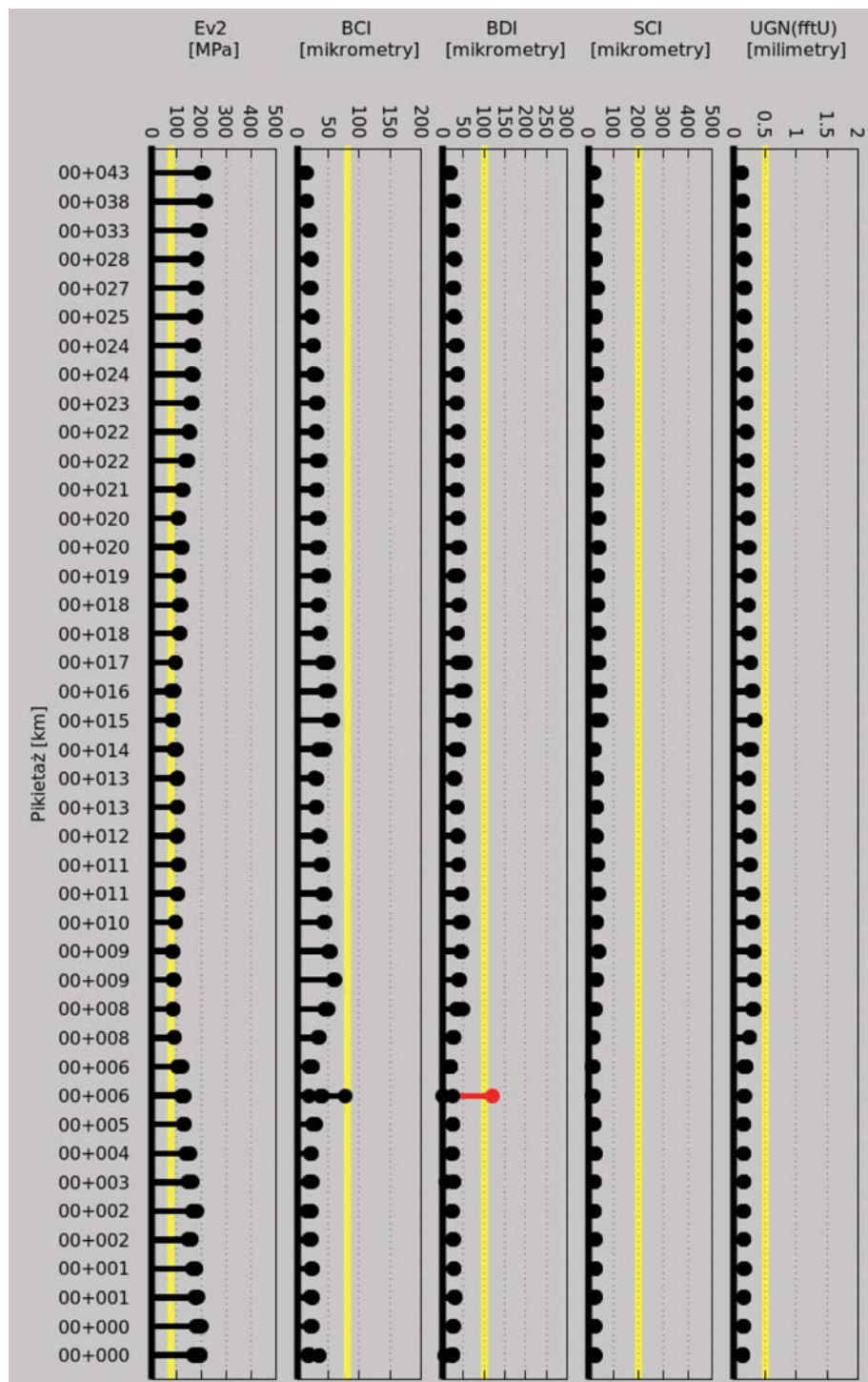
W przypadku każdego miejsca, w którym wykonano pomiar urządzeniem ZiSPON, wykonano obliczenia wartości dla parametru Ev2. Wielkość Ev2 znana jest powszechnie jako wtórny moduł odkształcenia [13]. Zaletą takiego podejścia jest przede wszystkim relatywnie łatwa interpretacja uzyskanych wartości, którą można sprowadzić do powszechnie obowiązujących w Polsce kryteriów dla podłoża nawierzchni, np.  $Ev2 \geq 100 \text{ MPa}$  dla kategorii ruchu od KR3 do KR4. W celach poglądowych zamieszczono poniżej wykresy, na których pokazana jest korelacja dla tej wielkości oznaczanej przy użyciu dwóch opisywanych technik i różnych warunków pomiaru Ev2 w terenie.

### Test przeciążenia nawierzchni

Podczas badań na odcinku doświadczalnym dokonano wstępnej oceny sztywności układu warstwowego i podjęto decyzję, że ze względu na konieczność uzyskania pełnego spektrum do oceny stanu technicznego wszystkich stref przekroju poprzecznego nawierzchni jezdni i jej podłoża, badania zostaną wykonane przy użyciu sekwencji obciążeń, a nie pojedynczego impulsu. W tym celu, zaprogramowany został cykl obciążeń w postaci: 50, 50, 60, 70 kN. W odróżnieniu od badań metodą pojedynczych impulsów obciążenia, albo serii obciążeń następujących po sobie obciążeń o tych samych wartościach, metoda sekwencji, pozwala na szerszą analizę właściwości nawierzchni, w porównaniu do podstawowego zakresu statystyk opisowych, jak to ma miejsce w klasycznym podejściu do analizy wyników badania ugięć nawierzchni jezdni na podstawie badań urządzeniami FWD. Z metody badań przy użyciu sekwencji obciążeń, którą w technologii ZiSPON można zaimplementować w dowolnym układzie, wynikają dwa dodatkowe aspekty, które są źródłem analiz poszerzających wiedzę na temat zachowania się nawierzchni w warunkach:

- skutków przeciążenia,
- penetracji układu warstwowego na

głębokość większą niż 1 metr poniżej górnej powierzchni warstwy ścieralnej, jak to ma miejsce w przypadku, gdy badania ograniczy się wyłącznie do badań np. przy obciążeniu równym 50 kN. Powszechnie przyjmuje się, że głębokość penetracji ośrodka wpływem fali mechanicznej w tego typu badaniach jest równa około trzem średnicom płyty obciążającej, czyli np. w przypadku urządzenia ZiSPON,  $3 \times 30 = 90 \text{ cm}$ .



Rys. 10. Wartości wskaźników dla pasa ruchu w stronę ronda (od lewej opisane w tekście wielkości Ev2, BCI, BDI, SCI oraz UGN(fftU) jako maksymalna wartość ugięcia w osi obciążenia po odfiltrowaniu wpływów dynamicznych obciążenia wg [18], żółte linie określają strefę wartości dopuszczalnych objaśnionych w tekście



Co do zasady, spodziewamy się, że wartości reakcji nawierzchni na obciążenia powinny rozkładać się równomiernie względem wartości zadeklarowanych przez operatora podczas badań.

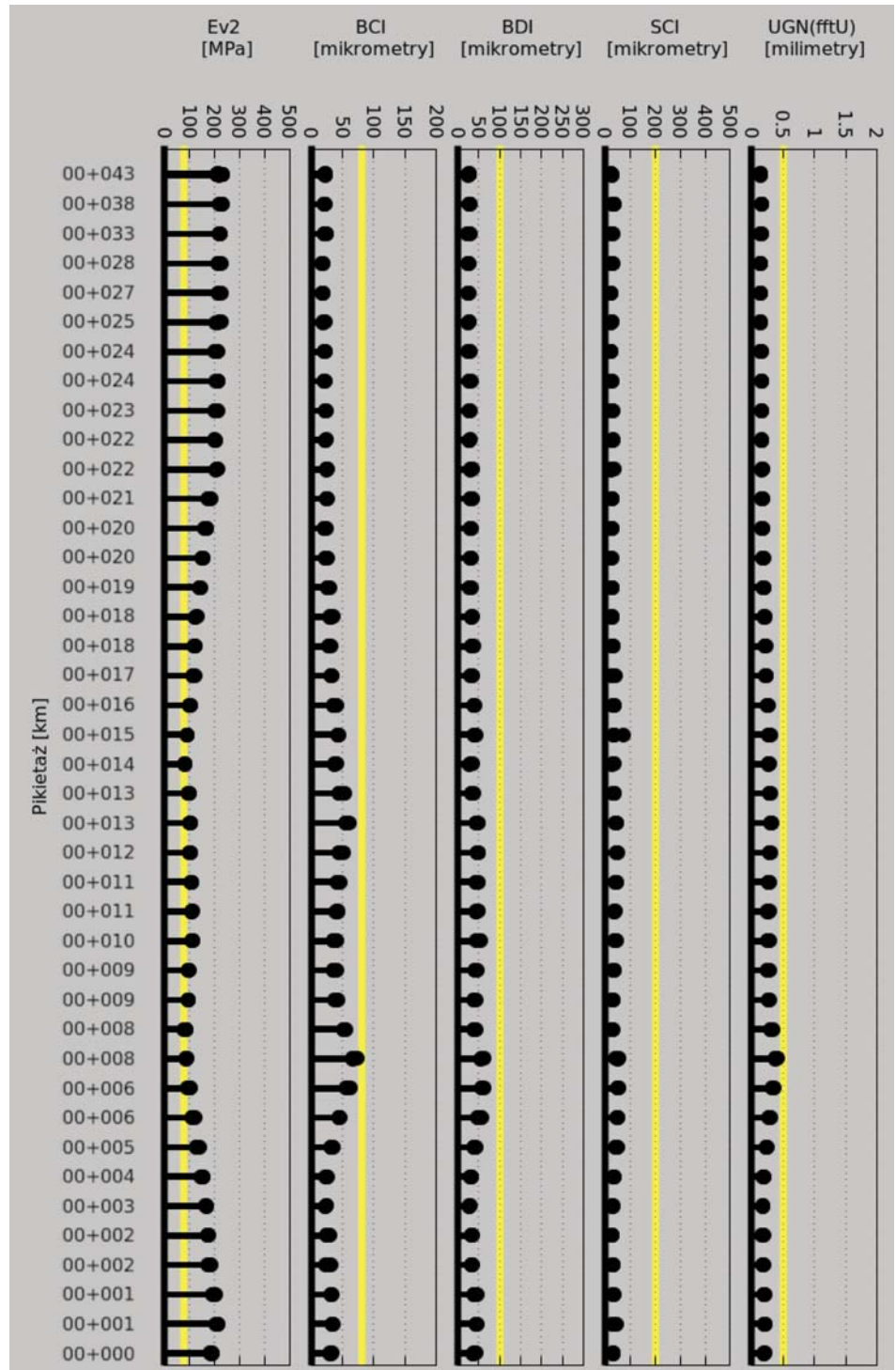
### Zestawienie wyników oceny wskaźnikowej dla nawierzchni odcinka doświadczalnego Omówienie analizy wyników badań

Na wykresach umieszczonych na rysunkach 10 i 11 na osi rzędnych (oś pionowa) umieszczony jest opis pikietażu drogi, który wskazuje miejsce pomiaru w nawiązaniu do kilometracji roboczej. Właściwości poszczególnych stref przekroju poprzecznego nawierzchni jezdni są opisane poprzez wielkości Ev2, BCI, BDI, SCI oraz UGN(fftU) [18]. Linie ciągłe zaznaczone kolorem żółtym oznaczają wartości dopuszczalne. Dla poszczególnych wskaźników stanowią one kryteria, które należy interpretować w następujący sposób:

- wykres nośności podłoża (są to wartości Ev2 [MPa], które należy utożsamiać z wartością wtórnego modułu odkształcenia podłoża nawierzchni oznaczonego jak dla pomiarów VSS na powierzchni warstwy podłoża, ale bez rozbiierania warstw konstrukcji nawierzchni),
- wykres wskaźnika BCI, którego wartości informują o stanie technicznym podłoża ( $BCI > 75 \mu\text{m}$  oznacza wątpliwy stan techniczny podłoża wg [10]. **UWAGA:** kryterium to przyjęto według literatury zagranicznej i jeszcze nie zostało dostatecznie zweryfikowane w warunkach charakterystycznych dla obszaru Polski. Wskazanie należy traktować jako pomocnicze do wskazań wartości Ev2),
- wykres wskaźnika BDI, którego wartości informują o stanie technicznym podbudowy nawierzchni, czyli tzw. strefy środkowej przekroju poprzecznego ( $BDI > 150 \mu\text{m}$  oznacza wątpliwy stan techniczny podbudowy),
- wykres wskaźnika SCI, którego wartości informują o stanie technicznym pakietu warstw bitumicznych nawierzchni ( $SCI > 200 \mu\text{m}$  oznacza, że warstwy bitumiczne są albo o niewielkiej grubości (łączna grubość pakietu warstw bitumicznych  $< 5 \text{ cm}$ ), albo są silnie spękane),

- wykres maksymalnych wartości ugięć nawierzchni (UGN(fftU)) oznaczonych w osi obciążenia. Na wykresach pokazano wartości w przeliczeniu do  $20^\circ\text{C}$  oraz obciążenia równego 50 kN.

Procedura ustalania kryteriów wykracza poza ramy tego artykułu, ale warto wspomnieć, że oprócz tradycyjnych metod analitycznych, wartości kryteriów są efektem działania



Rys. 11. Wartości wskaźników dla pasa ruchu w stronę obiektu mostowego (od lewej opisane w tekście wielkości Ev2, BCI, BDI, SCI oraz UGN(fftU) jako maksymalna wartość ugięcia w osi obciążenia po odfiltrowaniu wpływów dynamicznych obciążenia wg [18], żółte linie określają strefę wartości dopuszczalnych objaśnionych w tekście

interaktywnego informatycznego modułu aplikacji komputerowej, który oparto na algorytmach douczających się SSN, opartych na eksploracji bazy danych urządzenia i w konsekwencji technologii ZiSPON.

Uzupełnieniem analizy wartości wskaźników są wartości reakcji nawierzchni, jakie odnotowano podczas testów przeciążenia. Szczegółowy obraz konfrontacji wartości obciążeń zadeklarowanych przez operatora podczas pomiarów ugięć nawierzchni jezdni, i tych które opisują rzeczywistą reakcję nawierzchni na zadane obciążenia, pokazane są na wykresach rysunków 12 i 13. Analiza tych wyników pozwala określić:

1. Czy wartości opisujące reakcję nawierzchni na zadane obciążenia układają się zgodnie z rozkładem normalnym wokół wartości obciążeń, które były deklarowane podczas badań? Jeśli tak, to nośność doraźna układu war-

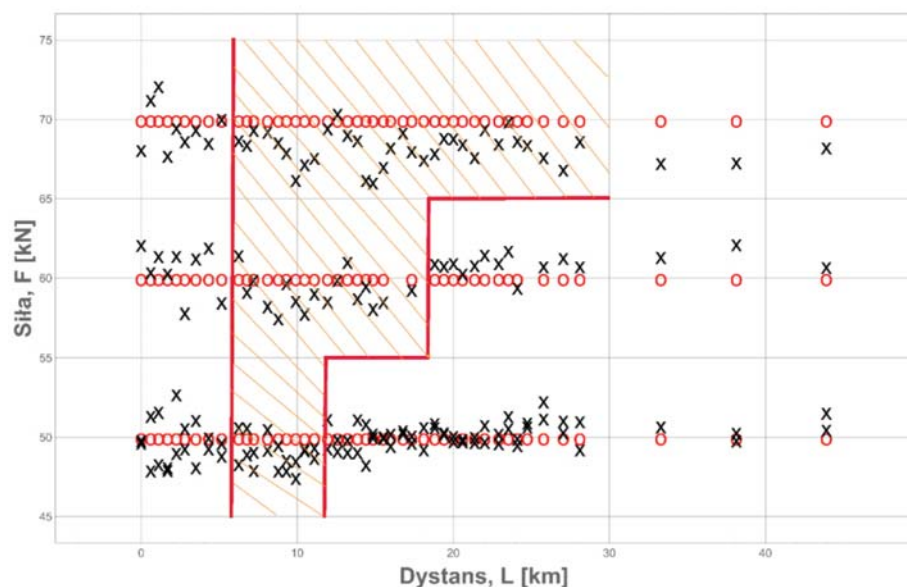
stwowego jest zadowalająca biorąc pod uwagę zakres wartości zadanych obciążeń.

2. Czy na wykresach przeciążenia można wskazać takie miejsca, w których wartości reakcji nawierzchni są mniejsze od zadanej wartości obciążenia? Jeśli tak, są to miejsca, w których nawierzchnia przenosi obciążenia pracując już w zakresie nieliniowym między wielkościami siła – ugięcie albo przekroczonych stanów granicznych.

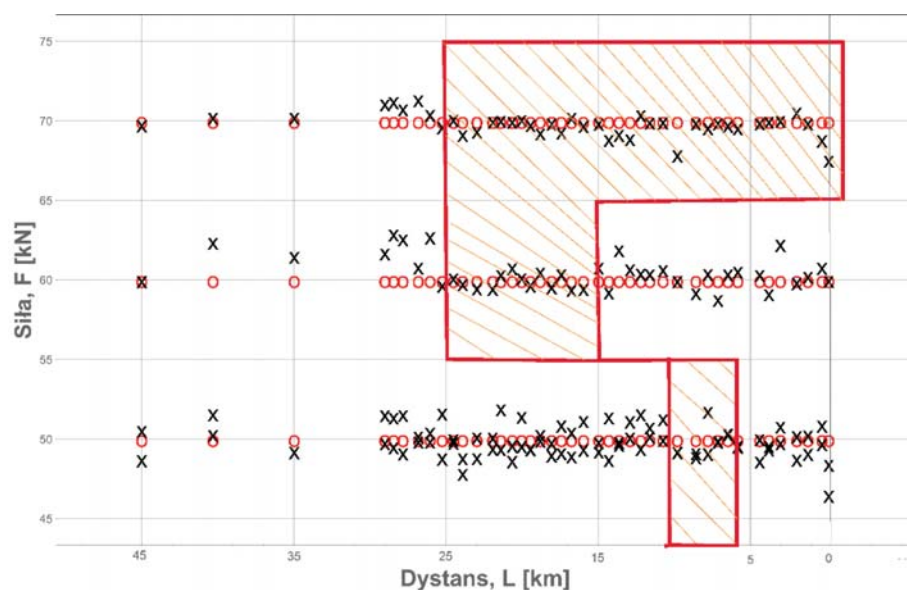
Z punktu widzenia wykrywania wad nawierzchni, szczególnie istotna jest analiza wartości reakcji nawierzchni na obciążenia, które są większe od tych projektowanych, a więc większe niż dopuszczalna wartość 57,5 kN/koło. Na rysunkach 12 i 13 zakresowane są strefy (kolorem pomarańczowym), na których odnotowane wartości reakcji nawierzchni znacząco różnią się od zadeklarowanych wartości obciążeń, albo trend

tych relacji zaczyna być zaburzony względem założenia o rozkładzie normalnym (wartości reakcji powinny rozkładać się po równo względem wartości zadeklarowanych przez operatora podczas badań). W przypadku obciążenia 50 kN, zarówno w odniesieniu do wyników badań na pasie ruchu dla kierunku jazdy w stronę ronda, jak i w stronę obiektu mostowego, reakcje nawierzchni na zadane obciążenia nie dają jednoznacznych przesłanek do wnioskowania o jakichkolwiek zaburzeniach. Odpowiedź nawierzchni jest taka, jakiej należy się spodziewać. W przypadku obciążeń o wartości 60 i 70 kN, na obszarach zakreskowanych, przeważająca część wartości reakcji nawierzchni jest mniejsza, w porównaniu do deklarowanych wartości obciążeń. Biorąc pod uwagę, że przy obciążeniach 60 czy 70 kN, penetruje się strefę podłoża warstw nawierzchni, można z dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że podłoże nawierzchni jezdni, odpowiadające tym zakreskowanym obszarom, ma mniejszą nośność niż w pozostałych miejscach. Innymi słowy, poza obszarami zakreskowanymi nawierzchnia jezdni i jej podłoże są zdolne do przenoszenia doraźnych wartości obciążeń, większych niż dopuszczalna wartość 57,5 kN/koło.

Wnioski te potwierdzają się również w odniesieniu do wskaźników pokazanych na rys. 14. Białą przerywaną linią oddzielone są wykresy, które sporządzono na podstawie analizy wyników nawierzchni obu pasów ruchu, na badanym odcinku jezdni o długości nieco mniejszej niż 45 metrów. Wykresy umieszczone po lewej stronie białej linii dotyczą pasa ruchu w kierunku obiektu mostowego i analogicznie, wykresy pokazane po prawej stronie białej linii dotyczą pasa ruchu w kierunku ronda.



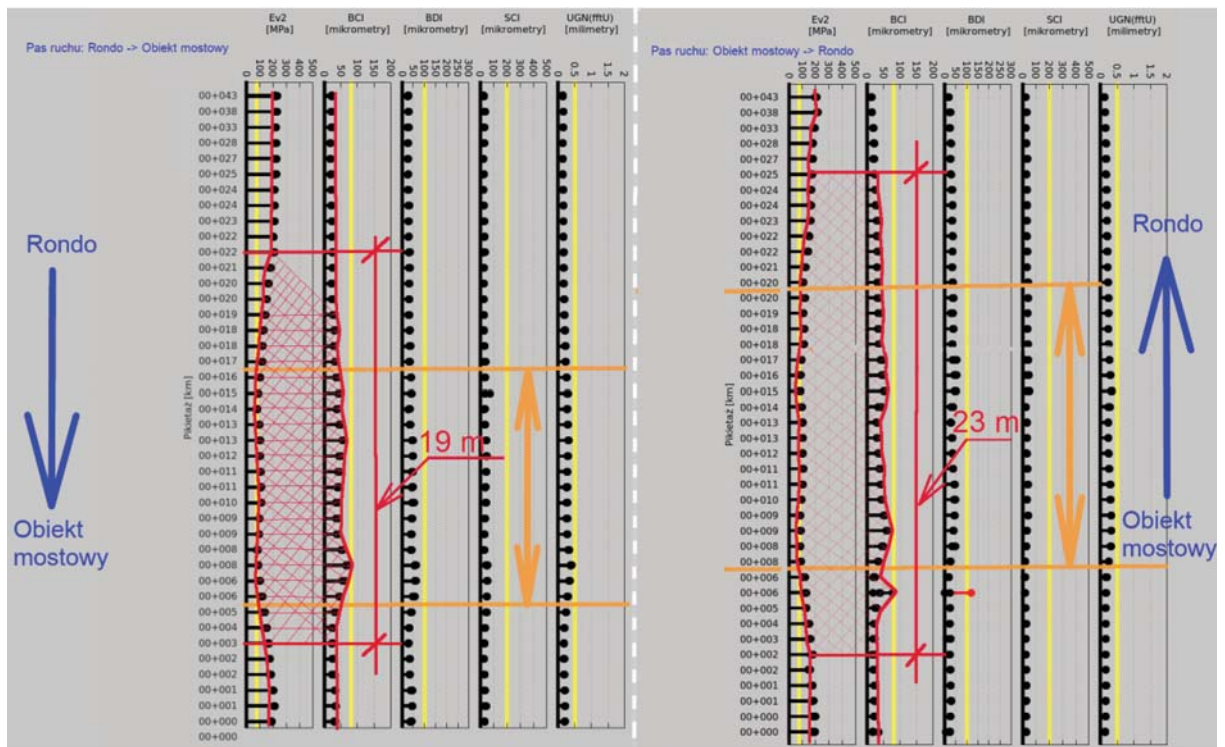
Rys. 12. Pas ruchu dla kierunku jazdy w stronę ronda



Rys. 13. Pas ruchu dla kierunku jazdy w stronę obiektu mostowego



Rys. 14. Zestawienie wyników analizy stanu technicznego wyrażonego wskaźnikami: Ev2, BCI, BDI, SCI i UGN(ITU)



Analiza wartości wskaźnika SCI (wskaźnika krzywizny powierzchni), odpowiedzialnego za opis stanu technicznego warstw asfaltowych, prowadzi do relatywnie jednoznacznych wniosków, bo przyjmując zadeklarowane wcześniej kryterium, z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że warstwy asfaltowe są w bardzo dobrym stanie technicznym. To oznacza, że warstwy te można wykluczyć jako potencjalną przyczynę nadmiernych osiadań, które zaobserwowano na warstwie ścieralnej nawierzchni jezdni.

Podobną hipotezę jak w przypadku wskaźnika SCI, można postawić w nawiązaniu do wartości uzyskanych dla wskaźnika BDI (wskaźnika uszkodzeń podbudowy), czyli wskaźnika, którego definicja pozwala na wykorzystanie go w analizach do oceny stanu technicznego tzw. warstw środkowych układów warstwowych, jakimi są nawierzchnie jezdni podatnych. W świetle analizy, którą przeprowadzono też dla wskaźników Ev2 (modułu wtórnego odkształcenia) i BCI (wskaźnika krzywizny podbudowy), istnieje małe prawdopodobieństwo, że warstwa podbudowy zasadniczej z materiałów niezwiązanych jest przyczyną zaobserwowanego przekroczenia stanów granicznych. Biorąc pod uwagę analizę wyników w teście przeciążenia, w połączeniu z analizą wartości wskaźników Ev2 i BCI, najniższym ogniwem badanego układu warstwowego jest strefa poniżej układu konstrukcyjnego nawierzchni. W świetle tych wniosków, jest to najbardziej prawdopodobne miejsce, które charakteryzuje się niewłaściwymi wartościami parametrów.

## Podsumowanie

W odniesieniu do badań nawierzchni jezdni in situ, które są integralną częścią obliczeń mechanistycznych, w wielu przypadkach można stwierdzić, że rozpoznanie nawierzchni jest niewystarczające i głównie dotyczy nowych odcinków

drog. Rozwiązanie techniczne, które wiąże technologię urządzenia ZiSPON z metodami pomiarowymi oraz oprogramowaniem komputerowym, składa się na system ekspercki, z założenia realizujący ściśle określone procedury, wymagane podczas oceny stanów granicznych nośności nawierzchni na poziomie projektu. Zakłada się, że system ekspercki łączący metody wykorzystujące zarówno fale mechaniczne, fale elektromagnetyczne, lokalizację geoprzestrzenną i algorytmy sztucznej inteligencji, w obszarze metod badawczych stosowanych w drogownictwie, pobudzi rozwój badań nawierzchni jezdni in situ na etapie projektowania [3]. Z przedstawionej dyskusji wyników badania ugięć nawierzchni jezdni nasuwają się następujące wnioski:

Biorąc pod uwagę uzyskane wartości analizowanych wskaźników SCI, BDI, BCI oraz Ev2, w żadnym przypadku nie zostały przekroczone wartości dopuszczalne. To oznacza, że zarówno pakiet warstw asfaltowych (tzw. górna strefa przekroju poprzecznego nawierzchni jezdni), jak i warstwa podbudowy zasadniczej (tzw. środkowa strefa przekroju poprzecznego nawierzchni jezdni) są w zadowalającym stanie technicznym na całej długości badanego odcinka.

W odniesieniu zarówno do wartości wtórnego modułu odkształcenia Ev2, jak i wskaźnika BCI, których analiza pozwala ocenić stan techniczny podłoża nawierzchni (tzw. dolnej strefy przekroju poprzecznego nawierzchni jezdni) można wyróżnić odcinki, na których wartości tych wskaźników albo wyraźnie osiągają wartości dopuszczalne, albo przyrosty ich wartości zmiernają w kierunku wartości krytycznych. Biorąc pod uwagę obserwowany trend, wyniki analizy testu przeciążenia oraz fakt, że wartości Ev2 utrzymują się w zakresie wartości charakterystycznych dla grupy nośności podłoża G2, najbardziej prawdopodobna lokalizacja najniższego ogniwa badanego układu warstwowego mieści się poniżej układu konstrukcyjnego nawierzchni.



Ostatecznie, przyjmując wyniki analizy oceny wskaźnikowej stwierdza się, że przyczyną zmian stanów granicznych nawierzchni jezdni jest niestabilne zachowanie się warstw zalegających poniżej dolnej strefy przekroju poprzecznego nawierzchni jezdni, w podłożu gruntowym. Mając na uwadze wyniki analizy przeciążenia i w następstwie możliwość analizy podłoża gruntowego nawierzchni jezdni na głębokości większej niż łączna grubość wszystkich warstw nawierzchni, wątpliwa strefa dotyczy warstw usytuowanych około 1 metra poniżej warstwy ścieralnej.

## Wnioski

Warto podkreślić, że często przy klasycznej analizie zarówno wyników badań urządzeniami typu FWD, jak i teorii przetwarzania tych danych stosuje się uproszczenia, które z merytorycznego punktu widzenia „uśredniają” obraz rzeczywistego stanu technicznego. W procedurach projektowania wzmocnień nawierzchni jezdni często brakuje dokładnych informacji na temat czynników takich jak wilgotność podłoża, odwodnienie nawierzchni, właściwości termiczne warstw asfaltowych, pora roku, czy starzenia się warstw asfaltowych i związany z nimi wzrost sztywności. To może prowadzić do niewłaściwych decyzji związanych z wyborem technologii napraw cząstkowych, remontów czy przebudów. Ocena wskaźnikowa stanowi rozszerzenie potencjału metod mechanistycznych, dlatego w przekonaniu autorów warto brać pod uwagę nieco szerszy zakres samych metod analitycznych, jak i stosowanie innowacyjnych technologii, które pozwalają zauważyć, że:

- Maksymalna wartość ugięcia sprężystego, którą określa się bezpośrednio w osi obciążenia, nie daje precyzyjnego obrazu o kształcie przekrojów czaszy ugięcia (promieniach krzywizny w różnych kierunkach). W ogólnym przypadku istnieje wiele układów warstwowych, które w danej chwili będą zwracać tę samą wartość ugięć sprężystych. Z tego powodu wartość ta określona w technologii ZiSPON jako UGN(fftU) traktowana jest jako jeden z wielu z wskaźników pomocniczych, które na etapie przetwarzania mają swój udział w podejmowaniu decyzji o zabiegach remontowych.
- Nawierzchnia jezdni to układ sąsiadujących ze sobą warstw o różnych właściwościach. Stan techniczny podłoża, rodzaj podbudowy i dodatkowych warstw, warto oceniać nie tylko poprzez pryzmat modułów sprężystości i metody mechanistycznej, ale również poprzez eksplorację systematycznie prowadzonych baz danych. Takie podejście w połączeniu ze sztuczną inteligencją rozwijaną w ramach algorytmów komputerowych, w naukach inżynierskich stanowi bardzo obiecującą metodę rozwiązywania zadań optymalizacyjnych z dużą liczbą zmiennych na wejściu, czyli typowych zadań w systemach utrzymania nawierzchni.
- Właściwa diagnoza stanu technicznego nawierzchni, oparta o szeroki wachlarz parametrów, prowadzi do właściwego rozpoznania genezy uszkodzenia nawierzchni jezdni, a w konsekwencji skutecznego powstrzymania niekontrolowanej degradacji nawierzchni i optymalnego wydatkowania środków finansowych na utrzymanie bieżące dróg. Ocena wskaźnikowa w technologii ZiSPON

wspiera rozpoznanie lokalizacji uszkodzenia w przekroju poprzecznym nawierzchni, generując wskazania najbardziej skutecznych w świetle przyjętych kryteriów technologii remontów i przebudów.

Ostatecznie warto również zauważyć, że podejście wskaźnikowe stanowi dobrą podstawę podziału nawierzchni jezdni na odcinki jednorodne, biorąc pod uwagę stan techniczny określonych stref przekroju poprzecznego. To oznacza, że analiza pozwala na wydzielenie odcinków, na których dominują uszkodzenia o określonej genezie, co determinuje właściwy proces podejmowania decyzji o technologii zabiegów. Atutem tego podejścia jest również optymalizacja procesów związanych z określaniem miejsc wierceń geotechnicznych, która będzie jednym z tematów kolejnych publikacji.

## Bibliografia

- [1] Górnaś P., Pożarycki A., *Zagadnienia liniowej normalizacji wartości ugięć nawierzchni jezdni poddanej obciążeniom ponadnormatywnym*, Drogownictwo, Nr 11, 2014, s. 353–361.
- [2] Kim T. R., Ranjithan S. R., Troxler J. D., Xu B., *Assesing pavement layer condition using deflection data*, Final report, North Carolina State University prepared for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, NCHRP 10–48, November 2000.
- [3] Pożarycki A., Górnaś P., Sztukiewicz R., *Zastosowanie fal mechanicznych i elektromagnetycznych w zintegrowanym systemie oznaczania nośności nawierzchni*, Roads and Bridges – Drogi i Mosty, nr 16, 2017, s. 101–114.
- [4] Pożarycki A., Górnaś P., *Zagadnienia liniowej normalizacji wartości ugięć nawierzchni jezdni poddanej obciążeniom ponadnormatywnym*. Drogownictwo, LXIX, 11, 2014, s. 353–361.
- [5] Pożarycki A., *Opracowanie: Analiza wskaźnikowa stanu technicznego odcinka nawierzchni jezdni w oparciu o wyniki pomiaru ugięć urządzeniem ZiSPON*. Badania ugięć nawierzchni jezdni wykonane w dniu: 4 września 2020 roku na odcinku doświadczalnym.
- [6] Pożarycki A., *Parametryzacja krzywej ugięć nawierzchni podatnych*. Drogownictwo 3/2019, s. 67–73.
- [7] Pożarycki A., *Condition assessment of lower roadway layers for pavement management systems*, Journal of Civil Engineering and Management, Volume 22, 2016 – Issue 3.
- [8] Sztukiewicz R., *Diagnostyka warstwy wierzchniej podatnej nawierzchni drogowej*, Drogownictwo, 1991, nr 7–8, s. 113–115.
- [9] Talvik O., Aavik A., *The Baltic Journal of road and bridge engineering*, 2009, 4(4), s. 196–202.
- [10] Xu B., Ranjithan S. R., Kim Y. K., *Case studies: using APLCAP for asphalt pavement layer condition assessment*, TRB 2003 annual meeting, November 2002.
- [11] *Diagnostyka stanu nawierzchni i wybranych elementów korpusu drogi – wytyczne stosowania*, Warszawa, maj 2019.
- [12] *Diagnostyka Stanu Nawierzchni – DSN, IBDiM*, Warszawa, 2012.
- [13] Załącznik B do normy PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- [14] Pożarycki A., Górnaś P., Turkot A., Warias D., Moralewski T., prezentacja pt. *Technologie inteligentnych badań nawierzchni: Technologia ZiSPON, Technologia CSR/Retekstrowanie*, Seminarium GDDKiA, Poznań, 2019.
- [15] Pożarycki A., Górnaś P., Brzeziński B., Węgliński S., prezentacja pt. *Ugięcia nawierzchni asfaltowych przy zastosowaniu belki Benkelmana w świetle katalogów wzmocnień i remontów oraz technologii ZiSPON*, XXXVII PSWNA „Asfalty Wielowymiarowe” SESJA III Diagnostyka Nawierzchni, Jachranka, 2017.
- [16] Ulotka Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad wydana w związku z 20-leciem wprowadzenia SOSN.
- [17] [http://www.hax-serwis.pl/?page\\_id=12](http://www.hax-serwis.pl/?page_id=12).
- [18] Pożarycki A., Górnaś P., *Filtracja efektów dynamicznych wywołanych w nawierzchni podczas badań ugięciomierzem FWD*, Drogownictwo, 1/2017, s.1–9
- [19] Fengier J., Pożarycki A., *Możliwości diagnozowanie podłoża nawierzchni jezdni na podstawie uproszczonego modelu ośrodków wielowarstwowych*, Drogownictwo, 5/2014, s. 170–177.