



SZYMON WĘGLIŃSKI

LABORTEST s.c. Brzeziński
weglinski.szymon@gmail.com



BARTOSZ BRZEZIŃSKI

LABORTEST s.c. Brzeziński
biuro@labortestbrzezinscy.pl

Analiza porównawcza wyników obliczeń nośności nawierzchni drogowych metodą ugięć przy zastosowaniu belki Benkelmana w świetle proponowanych zmian katalogu wzmocnień i remontów

Sieć drogowa w Polsce w ostatnich 10 latach została znacznie rozbudowana. W tym czasie zbudowano ponad 2 300 km nowych autostrad oraz dróg ekspresowych [1]. W ramach tych inwestycji wiele miast otrzymało nowe obwodnice, które mają pozytywny wpływ na poprawę przepustowości pozostałych dróg – wojewódzkich, powiatowych i gminnych. Władze państwowe, przy wykorzystaniu

funduszy pochodzących z budżetu państwa oraz funduszy unijnych, przygotowują wiele programów rozwoju sieci transportowej, dotyczy to zarówno dróg wchodzących w skład sieci transportowej Europy, jak i dróg o charakterze regionalnym czy lokalnym. Obecnie obowiązują m.in. Program Budowy Dróg Krajowych na lata 2014–2023 (z perspektywą do 2025 r.) i Program Rozwoju Gminnej i Powiatowej Infrastruktury Drogowej na lata 2016–2019 [12, 13].

W Polsce, według danych statystycznych Głównego Urzędu Statystycznego, na koniec 2014 roku długość wszystkich dróg publicznych wynosi ponad 417,0 tys. km [1], z czego drogi krajowe i autostrady (zarządzane przez GDDKiA) to ok. 19,3 tys. km (4,7%), drogi wojewódzkie ok. 28,5 tys. km (6,8%), drogi powiatowe ok. 125,3 tys. km (30,1%) i drogi gminne ok. 242,9 tys. km (58,4%) [12].

Biorąc pod uwagę stale wzrastający ruch pojazdów, w tym szczególnie samochodów ciężarowych, a także wzrost dopuszczalnych obciążeń przypadających na pojedynczą oś, z obowiązujących wcześniej 80 kN/oś (na drogach głównych i zbiorczych) do 100 i 115 kN/oś [11, 15], należy budować nowe drogi, odpowiednio zaprojektowane do przeniesienia zadanych obciążeń lub skutecznie wzmocniać istniejące już nawierzchnie, przy wykorzystaniu odpowiednich metod. Pomoc w projektowaniu stanowią katalogi typowych konstrukcji nawierzchni [5, 6] oraz katalog wzmocnień i remontów nawierzchni [8].

Konieczność wzmocnień nawierzchni

Infrastruktura drogowa wciąż zwiększa się o kilometry zrealizowanych nowych odcinków dróg ekspresowych i autostrad. Głównym zadaniem wymienionych szlaków jest przejęcie ruchu samochodowego, szczególnie tranzytowego, z lokalnych i regionalnych dróg. Oprócz samochodów osobowych wykorzystujących wymienione trasy, przede wszystkim w celu skrócenia czasów podróży z punktu A do punktu B, drogi krajowe i autostrady użytkowane są do przewozu ładunków przy zastosowaniu ciężkiego transportu drogowego. W przypadku nowych nawierzchni, ich konstrukcja jest właściwie zwymiarowana i przystosowana do cyklicznego obciążenia poprzez odpowiednio dobraną ilość warstw oraz postawione wymagania dotyczące zastosowania materiałów o wysokiej jakości.

Pozostałe kategorie dróg, również krajowe, ale także drogi wojewódzkie, powiatowe i gminne, które zostały wybudowane w latach siedemdziesiątych, osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, najczęściej mają konstrukcje, które nie były projektowane na tak duże obciążenia, jakie występują obecnie [9]. W wielu wypadkach projektowany okres eksploatacji ww. konstrukcji nawierzchni dobiega końca, zatem konstrukcje te wymagają wykonania remontów lub wzmocnień. Szczególnie narażone na degradację są drogi lokalne. Jako niektóre przyczyny przyspieszonego zniszczenia wspomnianych dróg, oprócz znacznego obciążenia ruchem spowodowanego wzrostem przewozów towarów środkami transportu drogowego, można za Najwyższą Izbą Kontroli [4, 14], wymienić także przejazdy maszyn budowlanych lub pojazdów budowy, związanych z realizacją nowych autostrad i dróg ekspresowych. Dodatkowy element w tym zakresie stanowią próby omijania przejazdów płatnymi odcinkami autostrad przez pojazdy ciężarowe.

W związku z koniecznością dokonania remontów lub przebudów głównie dróg krajowych, wojewódzkich i powiatowych, w celu ujednoczenia metodyki postępowania, po raz pierwszy w 2001 roku, na zlecenie ówczesnej Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych (GDDP), przygotowano w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów w Warszawie (IBDiM), *Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych* [8]. W 2013 roku, do opiniowania przekazano propozycję nowej wersji katalogu, opracowaną

ponownie również przez IBDiM na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA). Wersja ta jest w trakcie opiniowania.

W wyżej wymienionych publikacjach zawarto m.in. dwie metodyki dotyczące wymiarowania konstrukcji nawierzchni, w celu wykonania ich wzmocnienia.

Metoda pierwsza – metoda ugięć, powszechnie stosowana przy projektowaniu wzmocnień nawierzchni poddanych lżejszym obciążeniom ruchem. Metoda druga – metoda mechaniczna bardziej złożona, bazuje na analizie stanu naprężenia i odkształcenia nawierzchni. Uwzględnienia dane materiałowe wykonanych warstw konstrukcyjnych a także właściwości podłoża. Stosowana jest głównie przy wykonywaniu wzmocnień nawierzchni obciążonych ruchem bardzo ciężkim.

W niniejszej publikacji autorzy skupiają się na wykorzystywanej szeroko w praktyce metodzie ugięć, która jest stosowana w celu opracowania odpowiednich sposobów wzmocnień na przebudowywanych lub remontowanych odcinkach dróg wojewódzkich, powiatowych i gminnych. Drogi tych kategorii podlegają właściwym organom samorządu terytorialnego, zlecającym omawiane badania.

Metoda ugięć w świetle katalogów wzmocnień nawierzchni

Podstawowe założenie metody ugięć, sformułowane jako wzrost ugięć związany z powtarzającym się obciążaniem nawierzchni drogowej, wywodzi się z badań prowadzonych w latach 50 i 60 ubiegłego wieku w USA [16]. W Polsce po raz pierwszy zastosowano metodę ugięć w połowie lat 60 ubiegłego wieku, zaś pierwszym technicznym dokumentem wprowadzającym omawianą metodę do badań nawierzchni była norma branżowa z 1970 roku [2]. Badania ugięć do projektowania wzmocnień konstrukcji nawierzchni zastosowano po raz pierwszy w katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych z 1977 r. i uszczegółowiono w kolejnym katalogu z roku 1983.

Cechą charakterystyczną metody ugięć jest jej w miarę łatwa wykonalność. Występują jednak pewne ograniczenia w jej zastosowaniu tzn. [8]:

- maksymalne ugięcie sprężyste, zmierzone bezpośrednio pod punktem obciążenia, nie daje obrazu o kształcie czaszy ugięcia (promieniu krzywizny);
- zmiany ugięć nawierzchni, spowodowane starzeniem warstw asfaltowych i związanej z tym wzrastającą sztywności, a także wpływem czynników atmosferycznych na ich destrukcję, są procesem bardzo złożonym;
- trudność w precyzyjnym uwzględnieniu na wynik pomiaru czynników lokalnych, takich jak wilgotność podłoża, odwodnienie nawierzchni, temperatura warstw asfaltowych czy pora roku;
- wpływ rodzaju podbudowy – podatnej lub sztywnej, a także stan podbudowy, w przypadku warstw związanych spoiwami hydraulicznymi, w odniesieniu do fazy pracy (przed lub po wystąpieniu spękań).

Oceny ugięć nawierzchni dokonuje się przy zastosowaniu ugięciomierza belkowego, zwanego również belką Ben-

kelmana lub ugięciomierza dynamicznego FWD. Z uwagi na prostotę metody oraz koszt przeprowadzenia badań, w przypadku dróg, które najczęściej wymagają przebudów lub remontów, tj. wojewódzkich, powiatowych i gminnych, zazwyczaj wybiera się stosowanie ugięciomierza belkowego. W przypadku, gdy dany odcinek drogi jest obciążony ruchem kategorii bardzo ciężkiej ($KR \geq 5$), zaleca się stosowanie aparatury FWD.

Ugięciomierz belkowy (fot. 1) po raz pierwszy wykorzystano w 1953 roku podczas badań drogowych przeprowadzonych przez WASHO (*Western Association of State Highway Officials*), w stanie Idaho w USA. Nazwa urządzenia pochodzi od pracownika jednostki wykonującej badania, A. Benkelmana.



Fot. 1. Typowa belka Benkelmana



Fot. 2. Pomiar ugięć przy zastosowaniu belki Benkelmana

Belka jest nieinwazyjnym, przenośnym urządzeniem badawczym, które jest w stanie rejestrować ugięcia występujące pod aktualnie obciążonym punktem nawierzchni (por. fot. 2). Metoda badawcza pozwala także na zaprojektowanie wymaganych nakładek wzmacniających [17]. Zgodnie z normą branżową [2], ugięciomierz belkowy składa się z części stałej – podstawy z zamocowanym w uchwycie czujnikiem zegarowym, a także części ruchomej – dźwigni zawieszanej na osi obrotowej, złożonej z dwóch ramion, pierwszego, z macką o długości 240 cm, wsuwanego pomiędzy koła bliźniacze pojazdu wykorzystywanego w badaniu oraz drugiego, o długości 120 cm, na którym opiera się nóżka czujnika. Pod obciążeniem koła samochodu ciężarowego o osi standardowej 100 kN (50 kN na koło bliźniacze) nawierzchnia w miejscu pomiaru odkształca się, a macka pomiarowa zmienia wysokość o wartość U. Jednocześnie drugie ramię, na którym montuje się czujnik pomiarowy, podnosi jego nóżkę o wartość 0,5 U. Po pomnożeniu odczytanego wyniku przez współczynnik korygujący długość ramienia (wynoszący 2,0) uzyskuje się wartość ugięcia U.

Obecnie przyjęta forma metody ugięć, opisana szeroko w katalogu wzmocnień i remontów [8], zakłada że trwałość nawierzchni zależy od jej ugięcia sprężystego, mierzonoego w centralnym punkcie obciążanej konstrukcji. Większym wartościom ugięć odpowiada niższa trwałość zmęczenia. Zakłada się, że w przypadku obciążenia drogi ruchem pewnej kategorii, ugięcie miarodajne nie może przekroczyć ustalonej wartości, tzw. ugięcia dopuszczalnego. W przypadku jej przekroczenia należy wzmocnić konstrukcję nakładką o grubości, która pozwoli na zmniejszenie ugięcia, do wartości dopuszczalnej [8, 10]. Grubość nakładki zależy od przyjętego obciążenia ruchem (opisanego ilością osi obliczeniowych 100 kN) i ugięcia obliczeniowego, które uwzględnia ugięcie miarodajne badanego odcinka konstrukcji nawierzchni oraz współczynniki korygujące wyniki badań z uwagi na porę roku, w której prowadzone są pomiary, temperaturę warstw bitumicznych oraz rodzaj podbudowy. Zgodnie z założeniami, drogę przeznaczoną do remontu lub wzmocnienia należy podzielić na odcinki jednorodne, o zbliżonej wielkości ugięć sprężystych.

W celu podjęcia decyzji o konieczności wzmocnienia nawierzchni, należy określić ugięcie miarodajne, które w katalogu z 2001 roku [8] określono wzorem (1), a następnie porównać je z ugięciem dopuszczalnym (maksymalne, po którego przekroczeniu nawierzchnia wymaga wzmocnienia):

$$U_m = U_{\text{sr}} + 2 \cdot S_u \quad (1)$$

w którym:

U_{sr} – średnie ugięcie sprężyste dotyczące danego odcinka jednorodnego,

S_u – odchylenie standardowe ugięć sprężystych dotyczące danego odcinka jednorodnego.

Ocena nośności nawierzchni wyłącznie na podstawie ugięcia miarodajnego, które nie uwzględnia żadnego z ww. współczynników korygujących jest zdaniem autorów poważnym błędem. Ugięcie miarodajne w takim rozumieniu jest jedynie średnią arytmetyczną odczytów uzyskanych z pomiarów, powiększoną o dwa odchylenia standardowe i jest niezależne od terminu wykonania badań, warunków atmosferycznych i konstrukcji nawierzchni. Pominięty zostaje zatem m.in. wpływ poziomu wód gruntowych na stan podłoża (wyższy wiosną i jesienią), sztywność warstw bitumicznych (zależną od temperatury pomiaru) czy obecność warstw sztywnych w konstrukcji (znacznie zmniejszających wartość ugięcia). W przypadku obliczeń dotyczących wielu badanych odcinków, dokonano porównania ugięć obliczeniowych (wg wzoru 2., które katalog [8] zaleca wykorzystać jedynie w obliczeniach grubości nakładki wzmacniającej) z ugięciami dopuszczalnymi i na tej podstawie określają konieczność wzmocnienia:

$$U_{\text{obl}} = U_m \cdot f_t \cdot f_s \cdot f_p \quad (2)$$

w którym:

U_m – ugięcie miarodajne sprężyste,

f_t – współczynnik temperaturowy, korygujący ugięcia ze względu na temperaturę pomiaru,

f_s – współczynnik sezonowości, korygujący ugięcia ze względu na porę roku podczas wykonywania pomiaru,

f_p – współczynnik podbudowy, korygujący ugięcia z uwagi na rodzaj podbudowy.

Autorzy publikacji zastosowali ww. współczynniki bezpośrednio w przypadku każdego pomiaru, przed wydzieleniem odcinków jednorodnych. Argumentem przemawiającym za takim postępowaniem jest sytuacja, w której odcinek o tej samej konstrukcji (jednorodna podbudowa i zbliżona grubość warstw bitumicznych) badany jest w dwóch etapach, rozdzielonych odstępem czasowym, wynoszącym np. kilka dni, tygodni lub miesięcy, co wymusza pomiary w okresach o znacznie różniącej się temperaturze. Przykładem takim może być sytuacja, w której zarządca drogi zlecał wykonanie badań nośności drogi gminnej w kilku etapach, z uwagi na ograniczenia budżetowe.

Projekt katalogu wzmocnień z 2013 r. [7] wpisuje się w postępowanie autorów, gdzie również porównuje się ugięcia obliczeniowe z dopuszczalnymi. Wartości dopuszczalne w przypadku obu wydań katalogu przedstawiono w tabeli 1.

W tabelach 2–4 przedstawiono wartości współczynników korekcyjnych według definicji katalogowych. Obliczenie współczynnika temperaturowego nie uległo zmianom, temperaturę pomiaru koryguje się do temperatury miarodajnej, tj. 20°C. W odniesieniu do współczynnika sezonowości,

Tabela 1. Graniczne wartości ugięć z pomiarów belką Benkelmana pod obciążeniem 100 kN/os (opracowanie własne)

Kategoria ruchu	Ugięcia dopuszczalne [mm]	
	wg KWRNPP 2001 porównywane z ugięciami miarodajnymi	wg KPRNPP 2013 porównywane z ugięciami obliczeniowymi
KR1	1,20	0,85
KR2	1,10	0,70
KR3	0,80	0,60
KR4	0,50	0,50

który w katalogu [8] był określony w wąskim zakresie, po przeprowadzeniu badań przez IBDiM [3] wprowadzono początkowo okresy badawcze – zimowy, wczesnowiosenny, wiosenno-letni oraz jesienny. Następnie dokonano kolejnego szczegółowego doszacowania w przypadku okresów miesięcznych i końcowe wartości przedstawiono w katalogu [8]. Współczynniki korekcji z uwagi na rodzaj podbudowy doprecyzowano w projekcie katalogu [7], względem rodzaju zastosowanego materiału.

Tabela 2. Obliczanie wartości współczynnika temperaturowego f_t (opracowanie własne na podstawie [7, 8])

Współczynnik temperaturowy f_t	
KWRNPP 2001	KPRNPP 2013
$f_t = 1 + 0,02(20-T)$	
T - temperatura warstw asfaltowych w czasie badań (mierzona w połowie wysokości warstwy bitumicznej), w °C	

Tabela 3. Wartości współczynnika podbudowy f_p (opracowanie własne na podstawie [7, 8, 10])

KWRNPP 2001		KPRNPP 2013	
nawierzchnie podatne:	1,0	nawierzchnie podatne:	1,0
nawierzchnie półsztywne:	1,0 - 1,4	nawierzchnie z podbudową z kruszywa lub gruntu stabilizowanego cementem:	1,0 - 1,1
		nawierzchnie z podbudową z chudego betonu:	1,1 - 1,2
nawierzchnie półsztywne spękane:	~ 1,0	nawierzchnie z podbudową z betonu cementowego:	> 1,2
		nawierzchnie z podbudową z materiału stabilizowanego spoiwem hydraulicznym, spękane:	~ 1,0

Tabela 4. Wartości współczynnika sezonowości f_s (opracowanie własne na podstawie [3, 7, 8])

Współczynnik sezonowości f_s					
KWRNPP 2001		M. Graczyk i inni [3]		KPRNPP 2013	
wiosna:	1,0	marzec:	1,00	marzec:	1,00
		kwiecień:		kwiecień:	1,04
poza wiosną:	> 1,0	maj:	1,15	maj:	1,08
		czerwiec:		czerwiec:	1,12
		lipiec:		lipiec:	1,15
		sierpień:		sierpień:	1,17
		wrzesień:	1,25	wrzesień:	1,20
		październik:		październik:	1,22
		listopad:		listopad:	1,25
				grudzień:	1,28

Należy zauważyć, iż w projekcie katalogu z 2013 roku podwyższono wymagania wobec nawierzchni w zakresie dopuszczalnych ugięć. Zmiany nie polegają wyłącznie na obniżeniu wartości liczbowej ugięcia dopuszczalnego, lecz także wspomnianej redefinicji ugięcia dopuszczalnego: ocenie podlegały do roku 2013 ugięcia miarodajne, a w świetle propozycji katalogu ugięcia obliczeniowe. Ugięcia miarodajne, które nie uwzględniały współczynników korekcyjnych, w znacznej większości będą miały niższą wartość niż ugięcia obliczeniowe. Współczynniki podbudowy oraz sezonowości posiadają wartość co najmniej 1,0, a więc zwiększając wartość ugięcia obliczeniowego w odniesieniu do miarodajnego. Jedynie współczynnik temperaturowy przyjmuje wartości poniżej 1,0 tylko w przypadku pomiarów

wykonywanych na nawierzchniach o temperaturze warstw bitumicznych powyżej 20°C.

Podsumowując, przyjęto nie tylko jako wielkość ocenianą wyższe ugięcia obliczeniowe, ale również obniżono wartości ugięć dopuszczalnych (por. tabela 1). Przykładowo, konstrukcja nawierzchni, która posiada ugięcie sprężyste równe 0,8 mm wg katalogu z 2001 r. (gdzie w obliczeniu nie zastosowano zwiększających poprawek) spełnia wymagania w przypadku obciążenia ruchem kategorii nawet średniej (KR3). W świetle obecnych wymagań, proponowanych w katalogu z 2013 r., wg którego konieczne jest zastosowanie poprawek przed oceną, posiada wystarczającą nośność jedynie w przypadku obciążenia ruchem lekkim KR1 ($U_{dop} \leq 0,85$)!

Autorzy artykułu proponują, aby w przypadku konstrukcji nawierzchni zaprojektowanych na podstawie *Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych* z 1997 r. [5] i wykonanych przed 2014 r., kiedy to wprowadzono nowy katalog [6], należy stosować wartości dopuszczalne z katalogu [8]. W przypadku nowych nawierzchni, projektowanych według nowego katalogu, w którym przedstawiono sposoby wzmacniania podłoża i zdefiniowano nośności warstw dolnych konstrukcji nawierzchni (ulepszonych podłoża, warstw wzmacniających i podbudów) poprzez podanie wymaganych modułów wtórnego odkształcenia (E_2), należy stosować bardziej restrykcyjne, nowsze wymagania.

W celu prezentacji proponowanych zmian, autorzy na przykładzie badań odcinka drogi powiatowej, dokonali obliczeń w trzech wariantach (opisanych w kolejnym w dalszej części artykułu):

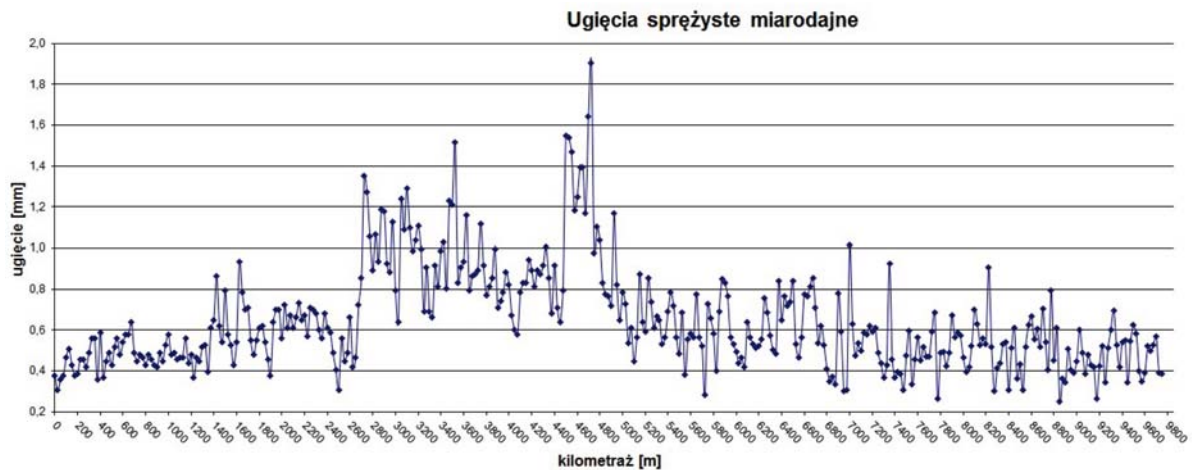
- wg KWRNPP z 2001 r.,
- wg KPRNPP z 2013 r.,
- wg propozycji na podstawie doświadczeń własnych oraz w/w katalogów.

Metoda ugięć w praktyce – przykład obliczeniowy

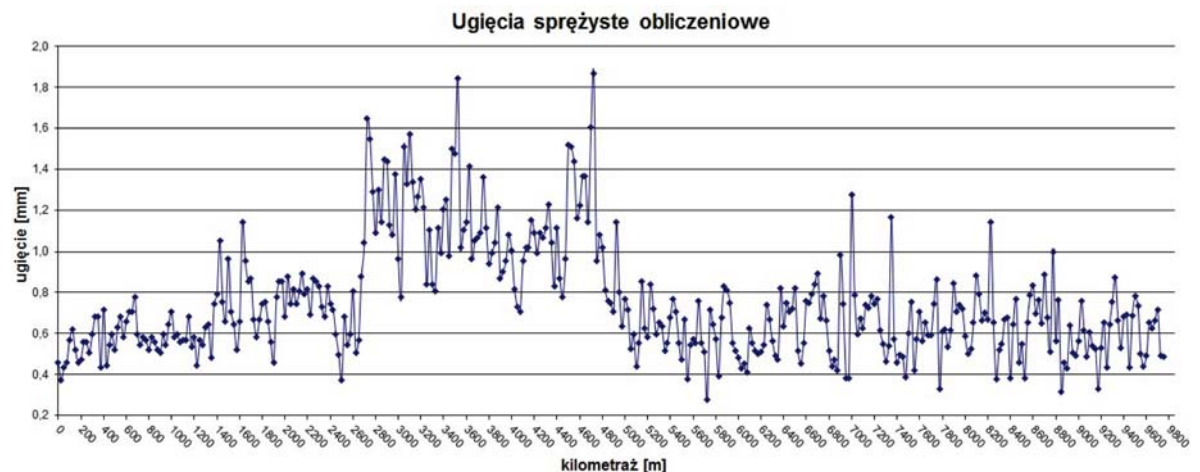
Założenia modelu:

- droga lokalna, powiatowa, jednojezdniowa, o dwóch pasach ruchu, długość 9,75 km;
- utwardzone pobocza wyłącznie w terenie zabudowanym (nie więcej niż 5–10% długości odcinka);
- podbudowa podatna na całym badanym odcinku (rozpoznanie na podstawie odwiertów w konstrukcję nawierzchni oraz rozmów z mieszkańcami) – kruszywo naturalne lub łamane, granitowa kostka brukowa, kamienie polne;
- badania prowadzone w trzech etapach:
 - ◇ etap I – lipiec, temperatura warstw bitumicznych ok. 21°C, odcinek 4,40 km (4+500 – 6+700, strona prawa i lewa);
 - ◇ etap II – listopad, temperatura warstw bitumicznych 9°C, odcinki o łącznej długości 12,05 km (0+000 – 4+500, strona prawa i lewa oraz 6+700 – 9+750, strona prawa);

Rys. 1. Wykres miarodajnych ugięć sprężystych (opracowanie własne)



Rys. 2. Wykres obliczeniowych ugięć sprężystych (opracowanie własne)



- ◇ etap III – listopad, temperatura warstw bitumicznych 5°C, odcinek 3,05 km (6+700 – 9+750, strona lewa).
- obciążenie ruchem kategorii średniej KR2 w km: 0+000 – 4+500 oraz ruchem kategorii KR3 w km: 4+500 – 9+750;
- w obliczeniach wzmocnienia przyjęto prognozowany ruch w wysokości odpowiadającej środkom przedziałów ilości osi obliczeniowych 100 kN tj. w przypadku kategorii KR2 – 295 000 osi i w przypadku kategorii KR3 – 1 500 000 osi.

Na podstawie przeprowadzonych badań nośności nawierzchni uzyskano wykresy ugięć sprężystych: miarodaj-

nych (postępowanie wg katalogów [7, 8], rysunek 1) oraz obliczeniowych (metoda autorów, rysunek 2). Wydzielono 4 odcinki jednorodne, zestawione w tabeli 5.

Tabela 5. Podział badanego odcinka drogi na odcinki jednorodne (opracowanie własne)

Odcinki jednorodne		Długość [km]	Obciążenie ruchem
I	km: [0+000 - 1+425)	1,425	KR2
II	km: [1+425 - 2+700)	1,275	KR2
III	km: [2+700 - 4+975)	2,275	KR2
IV	km: (4+975 - 9+975]	5,000	KR3

Tabela 6. Zestawienie wyników pomiarów ugięć

Zestawienie zbiorcze															
wariant:			wariant A - wg KWRNPP 2001				wariant B - wg KPRNPP 2013				wariant C - propozycja autorów				
nr odcinka:			I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
Obliczany parametr:	ugięcie średnie	U _{sr}	[mm]	0,47	0,60	0,97	0,55	0,47	0,60	0,97	0,55	0,72	0,92	1,38	0,76
	odchylenie standardowe	Su	[mm]	0,07	0,12	0,25	0,15	0,07	0,12	0,25	0,15	0,11	0,19	0,32	0,2
	ugięcie miarodajne	Um	[mm]	0,61	0,84	1,47	0,85	0,61	0,84	1,47	0,85	0,94 ²⁾	1,30 ²⁾	2,02 ²⁾	1,16 ²⁾
	współczynnik podbudowy	f _p	[-]	-	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00 ³⁾	1,00 ³⁾	1,00 ³⁾	1,00 ³⁾
	współczynnik sezonowości	f _s	[-]	-	-	1,23 ¹⁾	1,21 ¹⁾	1,25	1,25	1,23 ¹⁾	1,21 ¹⁾	1,25 ³⁾	1,25 ³⁾	1,15 / 1,25 ^{3) 4)}	
	współczynnik temperatury	f _t	[-]	-	-	1,17 ¹⁾	1,16 ¹⁾	1,22	1,22	1,17 ¹⁾	1,16 ¹⁾	0,98 / 1,22 / 1,30 ^{3) 4)}			
	ugięcie obliczeniowe	U _{obl}	[mm]	-	-	2,12	1,19	0,93	1,28	2,12	1,19	0,94 ²⁾	1,30 ²⁾	2,02 ²⁾	1,16 ²⁾
	ugięcie dopuszczalne	U _{dop}	[mm]	1,1	1,1	1,1	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	1,1	1,1	1,1	0,8
grubość zastępcza wzmocnienia	H _z	[cm]	brak	brak	47	31	14	27	47	31	brak	27	44	30	

- 1) współczynnik uśredniony z uwagi na pomiary wykonywane w różnym okresie roku
- 2) ugięcie miarodajne obliczeniowe z uwzględnieniem współczynników korekcyjnych w bezpośrednich obliczeniach ugięcia
- 3) współczynniki korekcyjne uwzględniono w bezpośrednich obliczeniach ugięcia
- 4) różnice wartości współczynników wynikają z wykonania pomiarów w różnym okresie roku

W przypadku wydzielonych odcinków jednorodnych wykonano niezbędne obliczenia, w zależności od przyjętego wariantu obliczeń, zgodnie z katalogiem z 2001 roku (lewa kolumna); z 2013 roku (kolumna środkowa) oraz wg propozycji własnej (kolumna prawa). Zestawienie wyników wraz z uwagami przedstawiono w tabeli 6.

Opis wariantów i obliczeń

Wariant A – postępowanie wg katalogu z 2001 r.

Pomierzone w przekrojach ugięcia uśredniono, następnie w przypadku każdego z odcinków obliczono ugięcie miarodajne. Uzyskane wyniki porównano z ugięciami dopuszczalnymi – dla obciążenia KR2 $U_{dop} \leq 1,1\text{mm}$ a dla KR3 $U_{dop} \leq 0,8\text{mm}$. Odcinki jednorodne nr I i II posiadają wystarczającą nośność i nie wymagają wzmocnienia. Odcinki nr III i IV wykazały zaniżoną nośność i należy je wzmocnić odpowiednią nakładką. W celu obliczenia grubości wspomnianej nakładki dla odcinków nr III i IV wyznaczono ugięcia obliczeniowe. Zastosowano współczynniki korekcyjne tzn. temperaturowy – z uwagi na pomiar w innej temperaturze warstw bitumicznych niż miarodajna, a także sezonowości (z wykorzystaniem publikacji [3]). Wartości współczynników zestawiono w tabeli 6. W przypadku odcinków, dla których badania wykonano w różnych etapach, wartość współczynnika jest średnią ważoną dla różnych etapów badania. Dla uzyskanych ugięć obliczeniowych oraz przyjętej kategorii ruchu (odpowiedniej ilości osi obliczeniowych), wyznaczono grubość zastępczą wzmocnienia, wg nomogramu przedstawionego w katalogu.

Wariant B – postępowanie wg projektu katalogu z 2013 r.

Postępowanie zbliżone do wariantu I, jednak po wyznaczeniu ugięć miarodajnych wyznaczono ugięcia obliczeniowe, z uwzględnieniem współczynników korekcyjnych (por. tabela 6). Następnie porównano uzyskane ugięcia obliczeniowe z dopuszczalnymi. Z uwagi na znaczne obniżenie wartości ugięć dopuszczalnych, w przypadku wszystkich odcinków stwierdzono zaniżoną nośność konstrukcji nawierzchni. Ostatecznie, na podstawie ugięć obliczeniowych oraz przyjętego obciążenia ruchem, obliczono minimalną grubość zastępczą wzmocnienia.

Wariant C – postępowanie wg metody stosowanej przez autorów w praktyce

Do każdego odcinka jednorodnego na podstawie ugięć miarodajnych oraz odchylenia standardowego wyznaczono ugięcia obliczeniowe. Uprzednio wartości współczynników korekcyjnych przemnożono przez bezpośrednie wyniki pomiarów. Następnie dokonano porównania uzyskanych wyników z wartościami ugięć dopuszczalnych, pochodzących z katalogu z 2001 roku (KR2: $U_{dop} \leq 1,1\text{ mm}$; KR3: $U_{dop} \leq 0,8\text{ mm}$), z uwagi na badania konstrukcji nawierzchni projektowanej na podstawie katalogów obowiązujących przed 2014 rokiem. Wyznaczenie grubości zastępczej nakładki wzmocniającej było konieczne w przypadku wszystkich odcinków jednorodnych z wyjątkiem odcinka nr I.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono własną propozycję postępowania, łączącą podejście stosowane w katalogu z 2001 roku i projekcie katalogu z 2013 roku oraz wieloletnie doświadczenie praktyczne autorów. Projekt nowego katalogu w algorytmie obliczeniowym uwzględnia nowe wartości współczynników korekcyjnych, które zostały w ostatnich latach uszczegółowione. Ponadto, cenna jest zmiana odnosząca się do porównania ugięć obliczeniowych, a nie miarodajnych, z dopuszczalnymi. Autorzy niniejszej publikacji zauważyli, i wiedzę tę stosowali już wcześniej, że ugięcia obliczeniowe dają bardziej rzeczywisty obraz nośności nawierzchni.

Dalsze prace nad aktualizacją przedmiotowych katalogów oraz wyeliminowanie możliwych błędów i przewymiarowania warstw wzmocniających powinny zdaniem autorów dotyczyć analizy wpływu poprawki temperaturowej na ocenę nośności nawierzchni z uwagi na udział warstw bitumicznych (ich łączną grubość w całej konstrukcji nawierzchni).

Bibliografia

- [1] *Bank danych lokalnych*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2016 <http://gus.gov.pl> [dostęp 20. 08. 2016r.]
- [2] BN-70/8931-06, *Drogi samochodowe. Pomiar ugięć sprężystych nawierzchni podatnych ugięciomierzem belkowym*.
- [3] Graczyk M. i inni, *Opracowanie współczynników sezonowości dla nawierzchnie dróg w polskich warunkach klimatycznych – Etap III*, IBDiM, Warszawa 2006.
- [4] *Informacja o wynikach kontroli wykonywania funkcji zarządcy dróg przez organy samorządu terytorialnego*, NIK, Warszawa 2011.
- [5] *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, GDDP, Warszawa 1997
- [6] *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, KIDPG, Gdańsk 2012 (Zarządzenie GDDKiA nr 31 z dnia 16.06.2014 r.).
- [7] *Katalogu przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych (projekt)*, IBDiM, Warszawa 2013 (Prace naukowo badawcze GDDKiA, tekst wg źródeł internetowych w opiniowaniu).
- [8] *Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych*, GDDP Warszawa 2001.
- [9] Marczak P., *Wpływ ciężkich pojazdów na stan dróg lokalnych*, Kancelaria senatu RP, Biuro analiz i dokumentacji, Warszawa 2009.
- [10] Mechowski T. i inni, *Analiza wpływu stanu podbudowy na ocenę nośności nawierzchni o konstrukcji półsztywnej*, IBDiM, Warszawa 2007.
- [11] *Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 23 grudnia 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*, Dziennik Ustaw poz. 124, Warszawa 2016.
- [12] *Program budowy dróg krajowych na lata 2014-2023 (z perspektywą do 2025 r.)*, Uchwała Rady Ministrów z dnia 8.09.2015, Warszawa 2015.
- [13] *Program rozwoju gminnej i powiatowej infrastruktury drogowej na lata 2016-2019*, Uchwała Rady Ministrów z dnia 8.09.2015, Warszawa 2015.
- [14] *Przeciwdziałanie niszczeniu dróg samorządowych przy budowie autostrad i dróg ekspresowych*, NIK, Warszawa 2016.
- [15] *Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie*, Dziennik Ustaw Nr 43 poz. 430, Warszawa 1999.
- [16] *The AASHO Interim Guide for the Design of Flexible Pavement Structures*, AASHO Committee on Design, Waszyngton 1961.
- [17] Visser A.F.H.M., Priambodo Koesrindartono D., *Towards a Mechanistic Analysis of Benkelman Beam Deflection Measurements*, Heron, Vol. 45 (2000) Nr 3, s. 177-195.