

Nowy polski katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych

**Prof. dr hab. inż. Józef Judycki, dr inż. Piotr Jaskuła, dr inż. Marek Pszczoła, mgr inż. Dawid Ryś,
mgr inż. Mariusz Jaczewski, dr inż. Jacek Alenowicz, dr inż. Bohdan Dołżycki, mgr inż. Marcin Stienss
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska**

„Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych” jest podstawowym dokumentem określającym konstrukcje nawierzchni drogowych oraz podstawowe wymagania technologiczne w drogownictwie. Poprzedni katalog wpro-

wadzono do stosowania w 1997 roku. Od tego czasu nastąpił duży postęp technologiczny w budowie dróg, wprowadzono nowe normy i wymagania techniczne dostosowane do normalizacji europejskiej. Zmieniono wymagania dotyczące materiałów

drogowych. Do stosowania w nawierzchniach wprowadzono nowe materiały. Nastąpił duży wzrost natężenia ruchu pojazdów oraz wzrost ich ciężarów i obciążeń osi. Wprowadzono nowe przepisy prawne w zakresie wymiarów i ciężarów pojazdów ciężarowych z uwzględnieniem Dyrektywy Unii Europejskiej. Zwiększono dopuszczalny ciężar osi pojedynczych i wielokrotnych. Rozpoczęto ważenie pojazdów w ruchu na rosnącej liczbie stacji pomiarowych. Równolegle nastąpił rozwój metod projektowania i badań konstrukcji nawierzchni oraz materiałów drogowych. Znacznie większą wagę przywiązuje się obecnie do zrównoważonego rozwoju, ochrony środowiska, zmniejszenia zużycia energii i recyklingu materiałów. Wszystkie te czynniki zadecydowały o tym, że zaistniała konieczność opracowania nowego katalogu. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) zleciła zespołowi Politechniki Gdańskiej opracowanie nowego katalogu. W wyniku kilkuletnich prac badawczych finalną postać katalogu opracowano w marcu 2013 roku, i katalog, po zaopiniowaniu przez krajowych specjalistów, udostępniono na stronach internetowych Politechniki Gdańskiej i GDDKiA [20]. Od tego czasu w Ministerstwie Infrastruktury i Rozwoju Regionalnego oraz w GDDKiA trwają prace nad prawnym wprowadzeniem katalogu do użytku. W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe informacje o nowym katalogu.

NOWE ELEMENTY W KATALOGU 2013

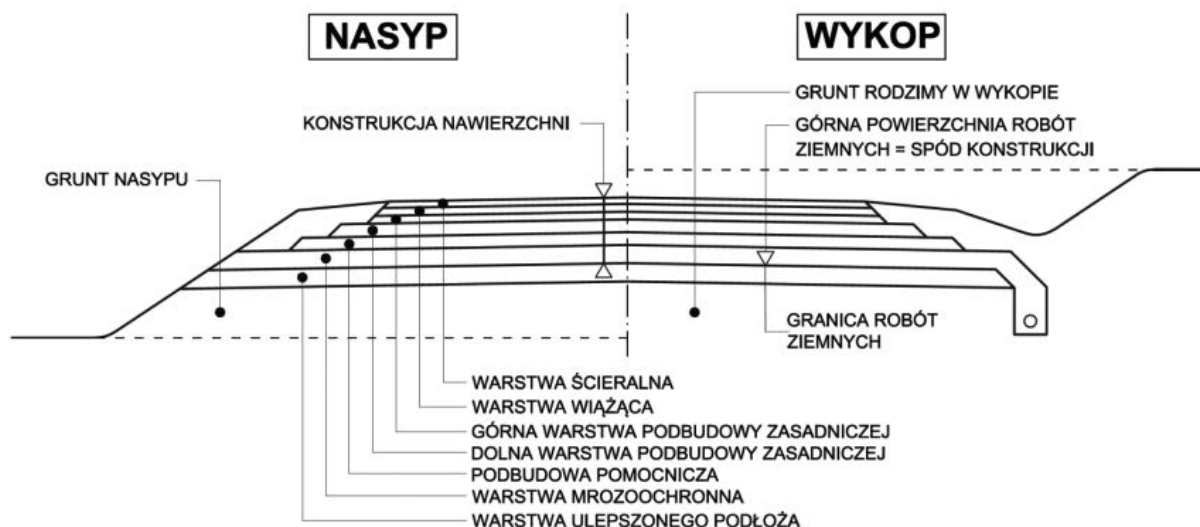
Nowy katalog, zwany dalej „Katalogiem 2013” różni się od poprzedniego, z 1997 roku, szeregiem elementów. Wśród najważniejszych zmian należy wyróżnić następujące:

- wprowadzono zmiany i uściślenia w terminologii konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych,
- wprowadzono 30-letni okres projektowy dla autostrad i dróg ekspresowych, pozostawiono 20-letni okres projektowy dla pozostałych dróg, uściślono obliczanie ruchu projektowego, uwzględniono rozwój ruchu drogowego i wprowadzono nową kategorię ruchu bardzo ciężkiego KR7 o znacznie większym ruchu projektowym niż obecnie,

- wprowadzono nieznaczne zmiany w klasyfikacji grup nośności podłoża gruntowego nawierzchni i uzupełniono ją o wymagany wtórny moduł odkształcenia E_2 , wprowadzono wymóg kontroli nośności gruntu w czasie robót, po odsłonięciu podłoża gruntowego w wykopach lub po uformowaniu nasypów, w celu sprawdzenia założeń projektowych,
- przyjęto trzy poziomy wymaganej nośności na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni, pod budowlą zasadniczą, w zależności od kategorii ruchu, usystematyzowano zasady stosowania warstw odsączającej i odcinającej,
- podano różnorodne rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne do warstw dolnych konstrukcji nawierzchni i warstwy ulepszonego podłoża,
- uwzględniono nowe materiały i technologie: cienkie warstwy ścieralne, warstwy ścieralne z asfaltu porowatego, materiały z recyklingu i materiały antropogeniczne oraz materiały związane spoiwami drogowymi, uwzględniono nowe wymagania materiałowe sformułowane zgodnie z normami europejskimi,
- określono konstrukcje typowe podane w nowym Katalogu 2013 [20] na podstawie obliczeń według metody mechanistyczno-empirycznej z zastosowaniem kilku nowych kryteriów zmęczenia i porównanie wyników obliczeń z konstrukcjami typowymi w krajach o podobnych warunkach klimatycznych, wykorzystano także dotychczasowe doświadczenia krajowe.

NOWY SCHEMAT I TERMINOLOGIA WARSTW NAWIERZCHNI

Prace nad nowym katalogiem bardzo utrudniał nieład, jaki występował w nazewnictwie warstw konstrukcji nawierzchni w polskich dokumentach technicznych. Miał on niekorzystny wpływ na proces projektowania, budowy i rozliczania robót drogowych. W wyniku przeprowadzonych studiów w nowym katalogu wprowadzono zmienioną terminologię warstw konstrukcji nawierzchni pokazaną na rys. 1 i 2. Nową terminologię



Rys. 1. Schemat warstw konstrukcji nawierzchni

Konstrukcja nawierzchni (nawierzchnia)	Warstwy górne konstrukcji nawierzchni	Warstwa ścieralna	
		Warstwa wiążąca	
		Podbudowa zasadnicza	Górna warstwa podbudowy zasadniczej
			Dolna warstwa podbudowy zasadniczej
	Warstwy dolne konstrukcji nawierzchni	Podbudowa pomocnicza	
		Warstwa mrozoochronna	
Podłoże gruntowe nawierzchni	Warstwa ulepszanego podłoża		
	Grunt rodzimy w wykopie lub grunt nasypowy w nasypie, zakwalifikowane do jednej z grup nośności podłoża od G1 do G4.		

Rys. 2. Schemat i nazwy warstw konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych oraz ulepszonego podłoża

szczegółowo wyjaśniono w Katalogu 2013 [20]. Wprowadzono podział na warstwy górne, warstwy dolne i warstwę ulepszonego podłoża. Wprowadzono także wyróżnienie dolnej i górnej warstwy podbudowy zasadniczej.

BADANIA OBCIĄŻENIA NAWIERZCHNI RUCHEM I OKREŚLANIE RUCHU PROJEKTOWEGO

Do projektowania konstrukcji nawierzchni według nowego Katalogu 2013 [20] ruch drogowy klasyfikowany jest z podziałem na siedem kategorii (od KR1 – ruch najłżejszy do KR7 – ruch najcięższy), określonych na podstawie ruchu projektowego. Ruch projektowy określany jest jako sumaryczna liczba równoważnych osi standardowych 100 kN przypadająca na obliczeniowy pas ruchu w całym okresie projektowym. Ruch projektowy oblicza się na podstawie następującego wzoru:

$$N_{100} = f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot (N_C \cdot r_C + N_{C+P} \cdot r_{C+P} + N_A \cdot r_A) \quad (1)$$

gdzie:

- N_{100} – ruch projektowy, czyli sumaryczna liczba równoważnych osi standardowych 100 kN w całym okresie projektowym nawierzchni przypadająca na pas obliczeniowy,
- N_C, N_{C+P}, N_A – sumaryczna liczba samochodów ciężarowych bez przyczep (C), samochodów ciężarowych z przyczepami (C+P) i autobusów (A) w całym okresie projektowym,
- r_C, r_{C+P}, r_A – współczynniki przeliczeniowe, odpowiednio liczby samochodów ciężarowych bez przyczep (C), liczby samochodów ciężarowych z przyczepami (C+P) i liczby autobusów (A) na liczbę równoważnych osi standardowych 100 kN,
- f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu,
- f_2 – współczynnik szerokości pasa ruchu,
- f_3 – współczynnik pochylenia niwelety.

Do wyznaczenia współczynników przeliczeniowych r_C, r_{C+P}, r_A do nowego Katalogu 2013 zastosowano dane z ważenia pojazdów w ruchu. Ważenie pojazdów w ruchu (ang. *Weighing in Motion* – WIM) odbywa się w sposób ciągły i dostarcza pełnych informacji o ruchu ciężkim, takich jak: rodzaj pojazdu, obciążenia poszczególnych osi, konfiguracja osi, wymiary pojazdu oraz prędkość. W ramach badań obciążenia nawierzchni ruchem wykorzystano dane z ważenia ponad 4,2 mln pojazdów. Analiza ruchu polegała m.in. na sporządzeniu rozkładów obciążenia osi i masy całkowitej pojazdów, określeniu struktury ruchu, wyznaczeniu rocznych, tygodniowych i dobowych zmian obciążenia

dróg oraz określeniu udziału pojazdów przeciążonych w ruchu. Najważniejszym elementem badań było określenie oddziaływania pojazdów na nawierzchnie, które wyraża się poprzez współczynniki równoważności obciążenia pojazdu. Współczynniki te obliczono dla każdego zważonego pojazdu z osobna, stosując następujące metody: AASHTO [1], prawo czwartej potęgi, metodę francuską [5], metodę funkcji matematycznych (Politechniki Gdańskiej) [21]. W zależności od metody uwzględniono istotne parametry charakteryzujące oddziaływanie pojazdów na nawierzchnie, do których należą: odstęp między sąsiednimi osiami w pojeździe (wpływ osi podwójnych i potrójnych), konstrukcja nawierzchni (podatna lub półsztywna) oraz grubość jej warstw, a także ciśnienie kontaktowe na styku opony i nawierzchni. Współczynniki przeliczeniowe wyznaczono na podstawie analizy statystycznej współczynników równoważności obciążenia poszczególnych pojazdów, mając na uwadze zmienność obciążenia pojazdów i ich osi w zależności od dopuszczalnego obciążenia i rangi drogi. Przy określaniu wartości współczynników przeliczeniowych uwzględniono również za-

Tabl. 1. Porównanie współczynników przeliczeniowych stosowanych w nowym katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych z 2013 roku i w starym katalogu z 1997 roku

Kategoria pojazdu	Katalog z 2013 roku				Katalog z 1997 roku
	Rodzaj drogi i dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej				
	Autostrady i drogi ekspresowe	Drogi krajowe	Pozostałe drogi		
	(115 kN)	(115 kN)	(115 kN)	(100 kN)	
Samochody ciężarowe bez przyczep C	0,50	0,50	0,45	0,45	0,109
Samochody ciężarowe z przyczepami C+P	1,95	1,80	1,70	1,60	1,245* 1,950**
Autobusy A	1,25	1,20	1,15	1,05	0,594

* wartość współczynnika przy udziale pojazdów o nacisku osi 115 kN w grupie pojazdów C+P poniżej 8%

** wartość współczynnika przy udziale pojazdów o nacisku osi 115 kN w grupie pojazdów C+P z zakresu 8 ÷ 20%

pas bezpieczeństwa, który wynika ze zmiennej charakterystyki obciążenia pojazdów na poszczególnych drogach, ruchu pojazdów przeciążonych, możliwości wzrostu obciążeń pojazdów i ich osi w przyszłości i oddziaływać dynamicznych pojazdów.

W tabl. 1 zestawiono współczynniki przeliczeniowe określone w nowym katalogu z 2013 roku oraz współczynniki przeliczeniowe stosowane w katalogu z roku 1997 roku. Dość duże zmiany w wartościach współczynników przeliczeniowych wskazują, jak ważna i potrzebna była ich weryfikacja i aktualizacja. Szczegółowy opis analiz ruchu ciężkiego i metody określania współczynników przeliczeniowych znajduje się w książce Judyckiego i in. [22] oraz w publikacji Rysia, Judyckiego i Jaskuły [27].

Nowością wprowadzoną w katalogu są współczynniki uwzględniające wpływ geometrii drogi na ruch projektowy, czyli współczynnik szerokości pasa ruchu f_2 i współczynnik pochylenia niwelety f_3 . Szerokość pasa ruchu wpływa na rozkład poprzeczny obciążeń od kół pojazdów. Na węższych pasach ruchu obserwuje się większą koncentrację obciążeń, co powoduje szybsze narastanie deformacji trwałych i szybszy przyrost spękań zmęczeniowych. Duże pochylenia podłużne drogi powodują wzrost składowych stycznych naprężeń w konstrukcji nawierzchni oraz zmniejszenie prędkości ruchu pojazdów ciężkich, co w konsekwencji prowadzi do bardziej agresywnego oddziaływania pojazdów ciężkich na nawierzchnie.

NOWE MATERIAŁY I TECHNOLOGIE W BUDOWIE NAWIERZCHNI W POLSCE

Budownictwo drogowe w ostatnich kilkunastu latach przeszło rewolucję technologiczną wynikającą z zastosowania nowych materiałów oraz nowych technologii związanych z pojawieniem się innowacyjnych rozwiązań technicznych oraz nowoczesnych maszyn. Zmiany dotyczące materiałów i technologii w Katalogu 2013 [20] były spowodowane w głównej mierze postępem technicznym, ale uwzględniły też wprowadzenie do stosowania w Polsce norm europejskich serii PN-EN. Największe zmiany w stosunku do katalogu z 1997 roku [29] przedstawiają się następująco:

- do wykonywania warstw ścieralnych dopuszczono stosowanie nowych rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych, takich jak mastyks grytowy (SMA) czy też asfalt drenażowy (PA): jedno i dwuwarstwowy;
- do podbudów zasadniczych z mieszanek niezwiązanych dopuszczono powszechniejsze stosowanie kruszyw częściowo przekruszonych; do tej pory, do podbudów zasadniczych, stosowano głównie kruszywa w pełni łamane, a kruszywa częściowo łamane były dopuszczone jedynie do kategorii ruchu KR1-KR2;
- do podbudów zasadniczych, do dróg o kategorii ruchu KR1-KR4 przewidziano możliwość zastosowania materiałów wytworzonych w technologii recyklingu na zimno (mieszanka mineralno-cementowo-emulsyjna, mieszanka mineralna z asfaltem spienionym); w katalogu z 1997 roku [29] nie proponowano tego rodzaju materiałów do nowych konstrukcji nawierzchni;

- w przypadku podbudów z materiałów związanych spoiwem hydraulicznym, zarówno w przypadku podbudów zasadniczych, jak i pomocniczych, klasę wytrzymałości materiałów uzależniono od kategorii ruchu, dla której ma być wykonana warstwa podbudowy; dotychczas nie różnicowano wymagań wytrzymałościowych takich materiałów w zależności od kategorii ruchu;
- w przypadku materiałów związanych spoiwami, zarówno kruszyw, jak i gruntów, oprócz dotychczas stosowanych spoiw, takich jak cement, żużle czy popioły lotne, dopuszczono również spoiwa drogowe, które są obecnie jednym z najpopularniejszych materiałów wiążących stosowanych do stabilizacji gruntów i kruszyw, ponieważ łączą w sobie cechy zarówno cementu, popiołu, jak i wapna; wiążą i osuszają stabilizowany materiał, przez co uzyskuje się bardzo dobre efekty w stosunkowo krótkim czasie;
- zalecono wykonywanie dolnych warstw nawierzchni związanych spoiwami w technologii mieszania na miejscu; takie rozwiązanie jest możliwe dzięki dużej popularności specjalistycznych urządzeń do stabilizacji materiałów na miejscu, co pozwala na uzyskanie wymaganych parametrów jakościowych.

W Katalogu 2013 [20] do większości stosowanych materiałów podano wymagania mające istotny wpływ na trwałość zmęczeniową nawierzchni, w przypadku pozostałych wymagań technicznych odesłano do wymagań krajowych opisujących szczegółowo poszczególne materiały stosowane w budownictwie drogowym.

Nowym, ważnym elementem z punktu widzenia technologii oraz stosowania materiałów jest wprowadzenie do Katalogu 2013 [20] możliwości projektowania indywidualnego. Takie postępowanie umożliwi dopuszczenie do stosowania rozwiązań materiałowych nieznanymi lub będących w fazie rozwoju w chwili powstawania katalogu, a tym samym nie będzie hamować stosowania nowych technologii, które dzięki temu będą mogły być szerzej wykorzystywane w budownictwie drogowym.

OKREŚLENIE WARUNKÓW GRUNTOWO-WODNYCH

W nowym Katalogu 2013 [20] zachowano ogólną procedurę klasyfikacji warunków gruntowo-wodnych w podłożu nawierzchni, stosowaną w dotychczasowym katalogu. Nośność podłoża określa nadal grupa nośności G_r . Wprowadzono jednak istotne zmiany, mające na celu uściślenie i udoskonalenie dotychczasowych zasad. Zmiany są zgodne ze współczesną praktyką w innych krajach europejskich. Najważniejsze zmiany w tym zakresie dotyczą:

- jednoznacznego różnicowania definicji podłoża gruntowego budowli ziemnej i podłoża gruntowego nawierzchni;
- określenia nowych wymagań co do głębokości od zakładanego spodu konstrukcji nawierzchni, do której należy poddać ocenie podłoże gruntowe nawierzchni pod względem warunków gruntowo-wodnych;

Tabl. 2. Klasyfikacja grup nośności podłoża gruntowego nawierzchni Gi

Grupa nośności podłoża gruntowego Gi	Wskaźnik nośności CBR po 4 dniach nasączenia wodą [%]	Wtórny moduł okształcenia E_2 [MPa]
G1	$CBR \geq 10$	$E_2 \geq 80$
G2	$5 \leq CBR < 10$	$50 \leq E_2 < 80$
G3	$3 \leq CBR < 5$	$35 \leq E_2 < 50$
G4	$2 \leq CBR < 3$	$25 \leq E_2 < 35$

- uzupełnienia klasyfikacji grup nośności podłoża (utrzymano stosowanie dwóch sposobów oceny – opartego o wskaźnik nośności CBR oraz o wysadzinowość gruntu i warunki wodne) o wymagane wartości wtórnego modułu okształcenia E_2 (tabl. 2);
- wprowadzenia obowiązku weryfikacji założeń projektowych w trakcie prac budowlanych poprzez porównanie wtórnego modułu okształcenia E_2 , osiągniętej na powierzchni podłoża gruntowego z jego wartością założoną podczas projektowania nawierzchni; w przypadku stwierdzenia niższej wartości modułu E_2 , niż założono w projekcie, konieczne jest przeprojektowanie dolnych warstw konstrukcji nawierzchni.

PROJEKTOWANIE DOLNYCH WARSTW KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI I WARSTWY ULEPSZONEGO PODŁOŻA

W trakcie prac nad nowym polskim Katalogiem 2013 [20] niezbędna była szczegółowa analiza literatury w zakresie stosowanych metod projektowania dolnych warstw konstrukcji nawierzchni oraz metod wzmacniania podłoża gruntowego nawierzchni, jakie są stosowane w innych dużych krajach europejskich, takich jak: Niemcy [26, 30], Wielka Brytania [14], Francja [13, 25], Austria [23, 28] czy też Hiszpania [8]. Metody te były następnie porównywane ze sposobami wzmocnień stosowanymi w Polsce. Dotychczasowy katalog z 1997 roku podawał bardzo ograniczone możliwości wyboru rozwiązań sprowadzające się do warstwy stabilizacji cementem lub wymiany gruntów. Szczegółowa analiza możliwych rozwiązań stosowanych w innych krajach wykazała, że w zależności od obciążenia ruchem i wartości modułu na powierzchni podłoża gruntowego projektant ma do wyboru szereg układów wzmacniających. Pozwala to na lepszą optymalizację doboru właściwych rozwiązań w zależności od istniejących warunków gruntowych i wodnych. Niedociągnięciem wynikającym ze

stosowania dotychczasowego katalogu z 1997 roku było na przykład stosowanie identycznego wzmocnienia w przypadku różnych wymagań w zakresie wtórnego modułu okształcenia (100 MPa i 120 MPa) oraz automatycznie utożsamianie występowania grupy nośności G1 z osiągnięciem tych wymagań. W związku z tym nie przewidywano wzmocnienia na przykład na podłożu gruntowym z piasków drobnych. W nowym katalogu zweryfikowano i wyeliminowano przedstawione uproszczenia i niedociągnięcia. Wprowadzono wymaganie minimalnej wartości wtórnego modułu okształcenia E_2 na poziomie warstwy ulepszonego podłoża, która powinna wynosić $E_2 \geq 50$ MPa. Na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni: podbudowy pomocniczej i/lub warstwy mrozochronnej wprowadzono wymaganie, że wymagane wartości E_2 zależą od kategorii ruchu. I tak w kategorii ruchu KR1-KR2 $E_2 \geq 80$ MPa, w kategorii ruchu KR3-KR4 $E_2 \geq 100$ MPa, natomiast w kategorii ruchu KR5-KR7 $E_2 \geq 120$ MPa.

Przeprowadzono obliczenia wielu układów wzmocnień z wykorzystaniem programu BISAR, przyjmując model wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Celem przeprowadzonej analizy obliczeniowej było sprawdzenie, czy założone układy warstw o przyjętych grubościach zapewniają osiągnięcie wymaganej nośności na powierzchni zarówno dolnych warstw konstrukcji, jak i warstwy ulepszonego podłoża. Do każdej z warstw przyjmowano odpowiednie wartości modułów sprężystości oraz współczynników Poissona. W przypadku każdego z analizowanych rozwiązań wyznaczano wartości ugięć sprężystych w na powierzchni warstwy ulepszonego podłoża oraz na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni. Wymagany moduł zastępczy E_{zast} na powierzchni analizowanych warstw obliczano, wykorzystując następujący wzór Boussinesqa:

$$E_{zast} = \frac{q \cdot D \cdot (1 - \nu^2)}{w} \quad (2)$$

gdzie:

E_{zast} – moduł zastępczy wyznaczany na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni oraz na powierzchni warstwy ulepszonego podłoża [MPa],

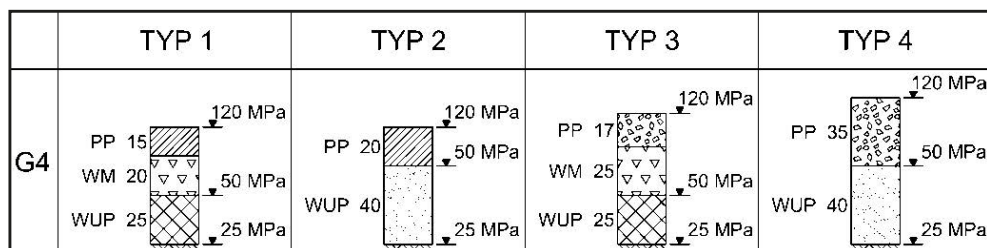
q – ciśnienie kontaktowe koła, $q = 0,65$ MPa,

D – średnica zastępcza śladu koła, $D = 0,313$ m,

ν – współczynnik Poissona, $\nu = 0,3$,

w – ugięcie na powierzchni układu warstw obliczone do modelu wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej z programu BISAR [m].

Obliczenia przeprowadzono do 14 różnych rodzajów dolnych warstw konstrukcji nawierzchni oraz warstwy ulepszonego podłoża i do wszystkich grup nośności podłoża gruntowego od G4 do G1. Przykład typowych rozwiązań (Typy 1-4) do kategorii ruchu KR5-7 i grupy nośności podłoża gruntowego G4 przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przykład typowych rozwiązań (Typy 1-4) do kategorii ruchu KR5-7 i grupy nośności podłoża gruntowego G4 (oznaczenia na rysunku: PP – podbudowa pomocnicza, WM – warstwa mrozochronna, WUP – warstwa ulepszonego podłoża)

Obliczone grubości warstw porównywano z rozwiązaniami analogicznych warstw podanych w katalogach i metodach innych krajów. Zaproponowane typowe rozwiązania dały możliwość ujednolicenia technologii robót na projektowanym odcinku drogi w przypadku zmienności występującego podłoża gruntowego. Duży nacisk położono na wykorzystanie zróżnicowanych materiałów z mieszanek związanych i gruntów stabilizowanych spoiwami, a także mieszanek niezwiązanych oraz gruntów niewysadzinowych (naturalnych lub antropogenicznych). Zaproponowano rozwiązania zapewniające odpowiednie odwodnienie włącznie konstrukcji nawierzchni.

Podstawową nowością w zakresie warstw dolnych konstrukcji nawierzchni i warstwy ulepszonego podłoża w nowym katalogu, w porównaniu z katalogiem z 1997 roku, jest możliwość wyboru rozwiązania projektowego spośród wielu wariantowych rozwiązań katalogowych. Ponadto przyjęte układy warstw są grubsze niż w katalogu z 1997 roku, jednak zgodne ze współczesnymi rozwiązaniami stosowanymi w innych krajach.

GÓRNE WARSTWY KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI

W studiach wstępnych dotyczących projektowania górnych warstw konstrukcji nawierzchni rozważano wykorzystanie szeregu metod mechanistyczno-empirycznych (Instytutu Asfaltowego [19, 24], Shella [4, 19], francuską [9, 15, 16], AASHTO 2004 [10, 11, 12, 17, 18], Dempsey [19], PCA [22]) oraz empirycznych (AASHTO 1993 [1]), a także porównanie obliczeń z katalogami typowych nawierzchni i poradnikami projektowania stosowanymi w innych krajach europejskich, m. in. w Niemczech [26], Francji [2, 3], Hiszpanii [8], Austrii [23] i Wielkiej Brytanii [6, 7]. Ze względu na zmiany, jakie zaszły w stosowanych materiałach drogowych od opublikowania stosowanych w poprzednim katalogu metod obliczeniowych, zdecydowano się wykorzystać metody Instytutu Asfaltowego, Shella oraz AASHTO 1993 wyłącznie jako obliczenia pomocnicze. Do dalszych obliczeń wykorzystano kryteria zmęczeniowe z nowej metody mechanistyczno-empirycznej AASHTO 2004 oraz

w pewnym stopniu z metody francuskiej. Ze względu na brak szczegółowych danych laboratoryjnych dotyczących cech materiałów nie było możliwe wykorzystanie kryterium deformacji podłoża gruntowego z metody AASHTO 2004, stąd zdecydowano się wykorzystać stosowane dotychczas kryterium deformacji podłoża gruntowego według metody Instytutu Asfaltowego.

Naprężenia i odkształcenia obliczano według teorii wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej (patrz rys.4a). W obliczeniach przyjęto, że oś pojedyncza przekazuje obciążenie poprzez dwa pojedyncze koła o śladzie zastępczym, kołowym o obciążeniu $P = 50$ kN i ciśnieniu kontaktowym $q = 850$ kPa, co jest dostosowaniem do obecnych trendów w zakresie pojazdów ciężarowych. Na rys. 4 przedstawiono model nawierzchni i jako przykład warstwy konstrukcji nawierzchni półsztywnej.

W przypadku nawierzchni podatnych jako główne kryteria zmęczeniowe stosowano kryteria: spękań rodzaju „z dołu do góry” warstw asfaltowych z najnowszej metody amerykańskiej M-ENPDM AASHTO 2004 (patrz wzory 3 i 4) [17], deformacji trwałych z metody Instytutu Asfaltowego 1982 [19, 24]. Liczbę obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych nawierzchni asfaltowej obliczono z następującego wzoru:

$$N_f = 7,3557 \cdot (10^{-6}) \cdot C \cdot k'_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281} \quad (3)$$

gdzie:

N_f – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych, na 50% całkowitej powierzchni pasa ruchu,

k'_1 – parametr określony w procesie kalibracji, zależny od grubości warstwy asfaltowej,

ε_t – odkształcenie rozciągające w punkcie krytycznym, w przekroju pionowym nawierzchni, liczba bezwymiarowa,

E – moduł sztywności warstwy asfaltowej, MPa,

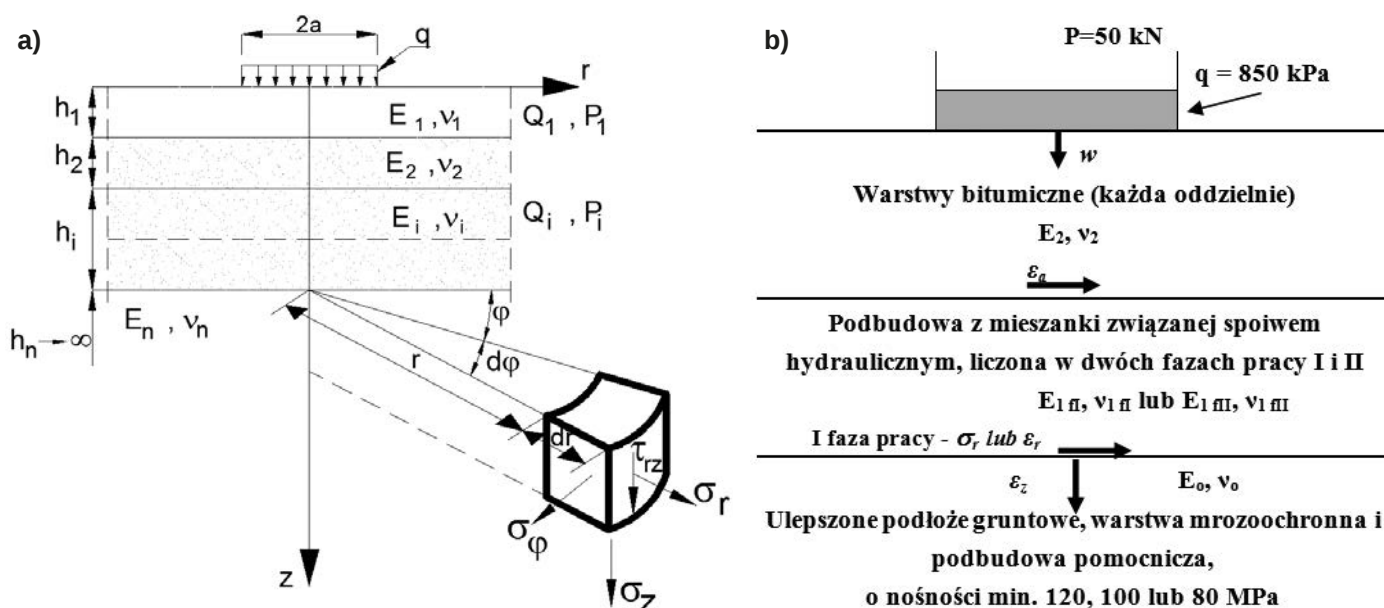
C – współczynnik zależny od właściwości objętościowych mieszanki mineralno-asfaltowej, określony zależnością $C = 10 M$, przy czym

$$M = 4,84 \cdot \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right) \quad (4)$$

gdzie:

V_b – efektywna zawartość asfaltu [% objętościowo],

V_a – zawartość wolnych przestrzeni [% objętościowo].



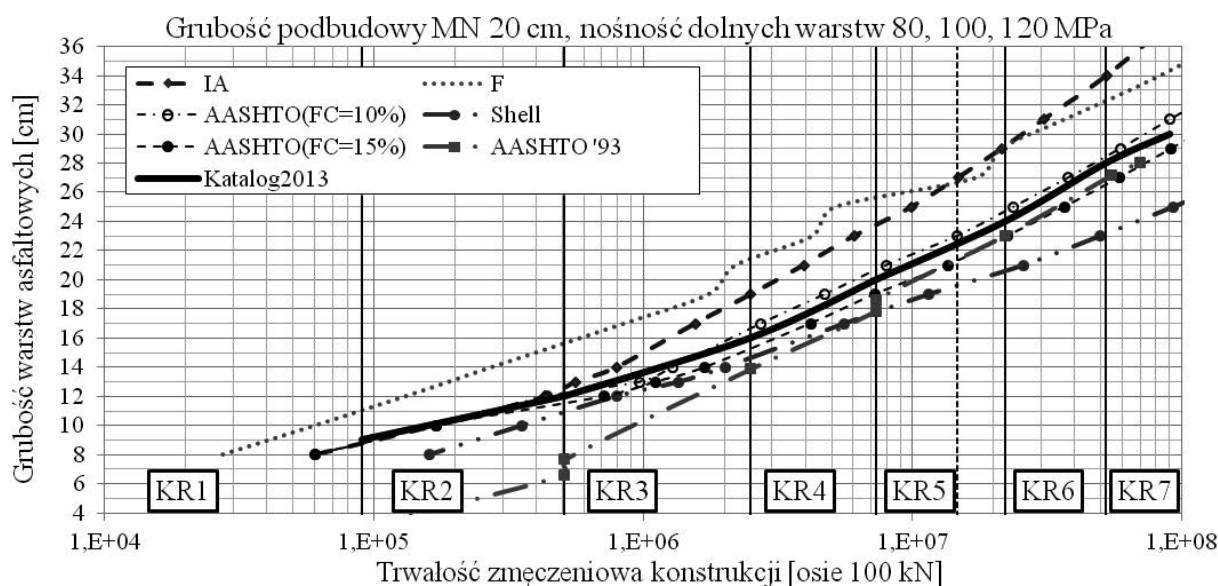
Rys. 4. Model obliczeniowy, a) wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej, b) model schematu obliczeniowego warstw konstrukcji nawierzchni półsztywnej

Kryterium AASHTO 2004 przedstawione wzorami (3) i (4) podaje liczbę powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych na 50% całkowitej powierzchni pasa ruchu. Można jednak, po odpowiednich przekształceniach wzorów, obliczyć liczbę obciążeń do wystąpienia dowolnego stopnia siatkowych spękań zmęczeniowych. Po analizach przyjęto następujące poziomy spękań zmęczeniowych: 10 ÷ 20% przy nawierzchni na podbudowach z mieszanki niezwiązanej i 5 ÷ 10% przy nawierzchni o podbudowach asfaltowych tzw. „w pełni asfaltowych” (ang. *full-depth asphalt pavements*).

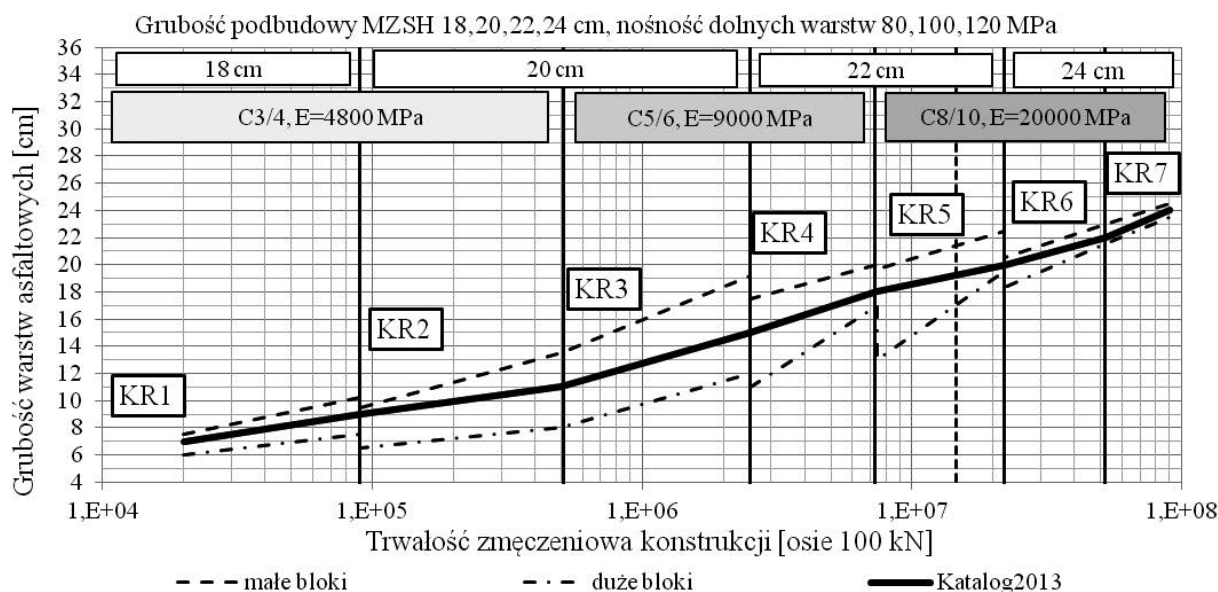
W przypadku nawierzchni półsztywnych uwzględniono dwie fazy pracy podbudowy zasadniczej związanej spoiwem hydraulicznym i dodatkowo zastosowano kryterium spękań warstw związanych, z metody AASHTO 2004, znane jako kryterium Dempseya, omówione przez Judyckiego [19].

Na podstawie wykonanych obliczeń i analiz, jak pokazano na przykładowych rys. 5 i 6, wszystkie przyjęte w Katalogu 2013 [20] grubości górnych warstw konstrukcji odpowiadają 100% pokryciu przedziału obciążenia w poszczególnych kategoriach ruchu. Dodatkowo, w obliczonych konstrukcjach uwzględniono tolerancje wykonawcze poprzez odpowiednie zwiększenie grubości warstw asfaltowych w stosunku do wyników obliczeń.

Nowością w stosunku do katalogu z 1997 roku jest rozszerzenie liczby typowych układów górnych warstw konstrukcji z podbudową zasadniczą z mieszanki niezwiązanej, dodanie rozwiązań z podbudową zasadniczą w technologii recyklingu na zimno oraz uwzględnienie stosowania warstw porowatych w warstwach asfaltowych. Zestawienie ostatecznie przyjętych grubości górnych warstw konstrukcji nawierzchni przedstawiono w tabl. 3.



Rys. 5. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni podatnej z podbudową z mieszanki niezwiązanej MN (C90/3) i grubości 20 cm obliczona według różnych kryteriów zmęczeniowych



Rys. 6. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni półsztywnej z podbudową z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym MZSH obliczona według kryterium zmęczeniowego AASHTO 2004

Tabl. 3. Zestawienie ostatecznie przyjętych grubości górnych warstw konstrukcji nawierzchni (warstwa ścierna BA/SMA/BBTM)

Lp.	Rodzaj konstrukcji nawierzchni	Grubość górnych warstw konstrukcji nawierzchni [cm]							
		Rodzaj warstw	Kategoria ruchu						
			KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
1.	Podatna	Warstwy asfaltowe	9	12	16	20	24	28	30
		Podbudowa z MN, $C_{90/3}$	20	20	20	20	20	20	20
2.	Podatna	Warstwy asfaltowe	9	12	16	20	24	28	30
		Podbudowa z MN, $C_{50/30}$	22	22	22	22	22	22	22
3.	Podatna	Warstwy asfaltowe	9	12	–	–	–	–	–
		Podbudowa z MN, C_{NR}	25	25	–	–	–	–	–
4.	Podatna	Warstwy asfaltowe łącznie z podbudową asfaltową	14	18	22	26	30	34	36
5.	Podatna	Warstwy asfaltowe	8	12	12	16	–	–	–
		Podbudowa z MCE/ASp.	15	15	20	20	–	–	–
6.	Półsztywna	Warstwy asfaltowe	9	11	15	18	20	22	24
		Podbudowa z MZSH	18	20	20	22	22	24	24
7.	Półsztywna	Warstwy asfaltowe	9	11	–	–	–	–	–
		Podbudowa z GSSH	18	20	–	–	–	–	–

W konstrukcjach nawierzchni półsztywnych spękania odbite stanowią istotny problem w utrzymaniu tego rodzaju nawierzchni, dlatego też w Katalogu 2013 [20] wprowadzono zapisy, których przestrzeganie i stosowanie istotnie ograniczy występowanie spękań odbitych. Dotyczą one wymagań technologicznych i materiałowych warstw związanych spoiwem hydraulicznym oraz specjalnych rozwiązań technicznych, takich jak: wykonywanie szczelin (rowków lub nacięć) w warstwie związanej spoiwem hydraulicznym oraz wykonanie warstw pośrednich.

PODSUMOWANIE

W nowym katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych [20] wprowadzono nowe współczynniki przeliczeniowe na równoważne osie, dodatkową kategorię ruchu, wydłużono okres projektowy nawierzchni autostradowych i ekspresowych, istotnie zmieniono i rozszerzono sposoby wzmocnienia podłoża gruntowego, wprowadzono nowe materiały i materiały z recyklingu do rozwiązań typowych górnych i dolnych warstw konstrukcji oraz ulepszono podłoża. Dodatkowo wprowadzono zapisy, które przyczynią się do istotnego ograniczenia występowania spękań odbitych w przypadku konstrukcji nawierzchni półsztywnych. W przyjętych w nowym katalogu konstrukcjach nawierzchni uwzględniono zapasy bezpieczeństwa w następujących elementach: w metodzie obliczania ruchu, we właściwościach materiałowych warstw asfaltowych, we właściwościach materiałowych podbudów związanych spoiwem hydraulicznym, w metodyce przyjęcia konstrukcji, jako układu katalogowego oraz w uwzględnieniu tolerancji wykonawczych.

Nowy katalog daje dużo większe możliwości wyboru różnorodnych rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych i ich dostosowania do warunków lokalnych.

LITERATURA

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO, USA, 1993.
2. Actualisation du Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves et guide de Dimensionnement des Renforcements de Chaussées Souples. SETRA, LCPC, 1988.
3. Catalogue des structures types de chaussées neuves. Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, SETRA, LCPC, 1998.
4. Claessen A. I. M., Edwards J. M., Sommer P., Uge P.: Asphalt Pavement Design – The Shell Method. Shell International Petroleum Company Ltd., 1977.
5. Corte J. F. i in.: Conception et dimensionnement des structures de chaussée. LCPC, Francja, 1994.
6. Design Manual for Roads and Bridges. Vol. 7, Section 2, Part 1 HD 26/06, Traffic Assessment, Luty 2006.
7. Design Manual for Roads and Bridges. Vol. 7, Section 2, Part 3 HD 26/06 Pavement Design, Luty 2006.
8. Estándar 6.1 IC, Secciones de firme. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento, España, 2003.
9. French Design Manual for Pavement Structures. Guide technique. Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, LCPC, SETRA, May 1997.

10. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report. Part 2 – Design Inputs. Chapter 4, Traffic. NCHRP, TRB, NRC, March 2004.
11. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report, Part 3 – Design and Analysis. NCHRP, TRB, NRC, March 2004.
12. Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Document. Appendix II-1. Calibration of Fatigue Cracking Models for Flexible Pavements. NCHRP, TRB, NRC, February 2004.
13. Guide technique: Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule I – Principes généraux, Service d'Études des Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), 2^{ème} Edition 2000.
14. Interim Advice Note IAN 73/06 Rev 1 Design Guidance For Road Pavement Foundations, 2009.
15. Jaczewski M., Judycki J.: Adaptacja francuskich kryteriów zmęczenia do projektowania nawierzchni podatnych w warunkach polskich. Drogownictwo, nr 5/2012, 164-170.
16. Jaczewski M., Judycki J.: Zastosowanie w warunkach polskich francuskiej metody projektowania nawierzchni asfaltowych o podbudowach związanych spoiwami hydraulicznymi. Drogownictwo, nr 6/2012, 199-203.
17. Judycki J.: Budowa i kalibracja modeli spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004. Drogi i Mosty, nr 4/2011, 31-53.
18. Judycki J.: Modele spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004. Drogownictwo, nr 11/2011, 343-347
19. Judycki J.: Porównanie kryteriów zmęczeniowych do projektowania podatnych i półsztywnych nawierzchni drogowych w aspekcie nowego polskiego katalogu konstrukcji typowych (część 1). Drogownictwo, nr 1/1999, 5-18.
20. Judycki J. i in.: Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Politechnika Gdańska, Gdańsk, Wersja 11.03.2013 r., (dostępny na stronie internetowej https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-po-roku-2_3432/Weryfikacja%20KataloguTNPiP_Etap4_final_11%2003%202013.pdf).
21. Judycki J.: Grajewska A. i in.: Opracowanie zaleceń do obliczania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych. Niepublikowana praca wykonana na zlecenie GDDKiA, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2006.
22. Judycki J., Jaskuła P., Pszczola M., Ryś D., Jaczewski M., Alenowicz J., Dołycki B., Stienss M.: Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2014.
23. Oberbaubemessung RVS 03.08.63, Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse, Schienne, Verkehr, Wydanie z 1 kwietnia 2008.
24. Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS -1). Ninth edition, The Asphalt Institute, Research Report No. 82-2, RR-82-2, August 1982.
25. Retraitement en place a froid des anciennes chaussées. Przewodnik techniczny, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), Bagneux Cedex, Francja, 2003.
26. RStO 01 – Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen. FSV, Ausgabe 2001.
27. Ryś D., Judycki J., Jaskuła P.: Aktualizacja współczynników równoważności pojazdów ciężarowych i autobusów. Drogownictwo, nr 7-8/2011, 245-249.
28. Sommer H. i in.: Überarbeiten der RVS 8.05.13 Zementstabilisierte Tragschichten. Austrian Ministry for Traffic, Innovation and Technology, Heft 520, 2002.
29. Sybilski D. i in.: Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. IBDiM, GDDKiA, Warszawa 1997.
30. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau ZTVE-StB 94. Wydanie 1994 / redakcja 1997.