

mgr inż. Tomasz Mechowski
prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski
inż. Przemysław Harasim
Instytut Badawczy Dróg i Mostów

Ocena wpływu obciążenia dróg pojazdami ciężkimi na trwałość nawierzchni

Evaluation of the heavy load traffic influence on the durability pavement

Streszczenie:

Ruch pojazdów ciężarowych stanowi główną przyczynę uszkodzeń nawierzchni drogowych. W Instytucie Badawczym Dróg i Mostów w ostatnich latach wykonano kilka prac badawczych, których celem była ocena wpływu obciążenia drogi pojazdami ciężkimi na trwałość nawierzchni. Analizie poddano różne konfiguracje i wielkości nacisków przekazywanych przez pojazdy na drogę. Uwzględniono cechy konstrukcyjne pojazdów mające wpływ na wielkość i sposób obciążenia nawierzchni takie jak: zawieszenie pneumatyczne lub sztywne, koło bliźniacze i pojedyncze. Wyniki analiz oraz zebrane dane rzeczywiste ze stacji ważenia pojazdów pozwoliły również na oszacowanie wartości nowych współczynników przeliczeniowych grup pojazdów, uwzględniających aktualną strukturę ruchu drogowego.

Abstract:

Heavy load traffic is the main cause of the pavement deterioration. During last years the Road and Bridge Research Institute has made some research, which aim was evaluation of the heavy load traffic influence on the pavement durability. Different configurations and pressures transferred by vehicles on the road have been analyzed. The vehicle construction features which influence the values and the way of pavement construction loading such as air and steel suspension or single and double wheel have been taken into consideration. The analysis results and the data collected in the vehicle weight control station allowed to estimate the new load factor values, reflecting the current traffic structure.

1. Wprowadzenie

Nawierzchnia drogowa, tak jak każdy produkt, ulega zużyciu, zniszczeniu podczas eksploatacji. Dwa czynniki wpływają na niszczenie nawierzchni: ruch pojazdów i klimat. Jednak przejazdy pojazdów stanowią główną przyczynę zniszczenia nawierzchni. Im większa masa (ciężar) pojazdu, tym większe oddziaływanie niszczące na nawierzchnię. Liczy się zatem nie tylko natężenie (liczba pojazdów w jednostce czasu), lecz także, a niekiedy przede wszystkim, ich ciężar wyrażany obciążeniem osi.

W wielu krajach, także i w Polsce, część pojazdów ciężarowych jest przeciążona, co powoduje dodatkowo ponadnormatywne, zwiększone oddziaływanie na nawierzchnię. Jeśli stan nawierzchni sieci drogowej jest dobry, to zwiększenie zniszczeń wskutek przeciążenia pojazdów jest mniejsze niż wtedy, gdy nawierzchnia jest w złym stanie technicznym i nierówna. W tym wypadku dochodzi bowiem zwiększenie agresywności obciążenia pojazdem wskutek efektu oddziaływania dynamicznego. Wziąwszy pod uwagę stan dróg w naszym kraju trzeba wyraźnie stwierdzić, że pojazdy o ponadnormatywnym obciążeniu przynoszą znacznie większe szkody niż w krajach Europy Zachodniej. Efektem jest dalsze pogarszanie stanu nawierzchni.

W wymiarowaniu konstrukcji nowych i użytkowanych nawierzchni stosuje się współczynniki przeliczeniowe grup pojazdów na osie obliczeniowe 100 kN. Wartości tych współczynników opracowane zostały dla potrzeb „Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych” z 1997 roku [1], na podstawie GPR 1995. Od tego czasu zmieniła się zarówno wielkość jak i struktura ruchu, a w szczególności nastąpił znaczny wzrost obciążenia nawierzchni pojazdami ciężarowymi z przyczepami.

W niniejszym referacie przedstawiono metodykę jaką zastosowano w celu oszacowania nowych, uaktualnionych wartości współczynników przeliczeniowych oraz wyniki analiz.

2. Metoda obliczenia współczynników przeliczeniowych

Analizy obliczeniowe współczynników przeliczeniowych wykonano według następującego algorytmu:

- zebranie danych rzeczywistych z ważeń pojazdów,
- uwzględnienie wpływu dynamiki obciążeń na rzeczywiste naciski wywierane przez koła pojazdów na nawierzchnię drogową,
- uwzględnienie specyfiki oddziaływania na konstrukcję drogową koła pojedynczego i koła bliźniaczego,
- obliczenie współczynników agresywności pojazdów zważonych,
- ustalenie struktury ruchu pojazdów ciężkich na podstawie pomiarów na odcinkach drogowych,
- obliczenie średnich agresywności sylwetek pojazdów ciężkich,
- obliczenie współczynników przeliczeniowych.

3. Zebranie danych rzeczywistych z ważeń pojazdów

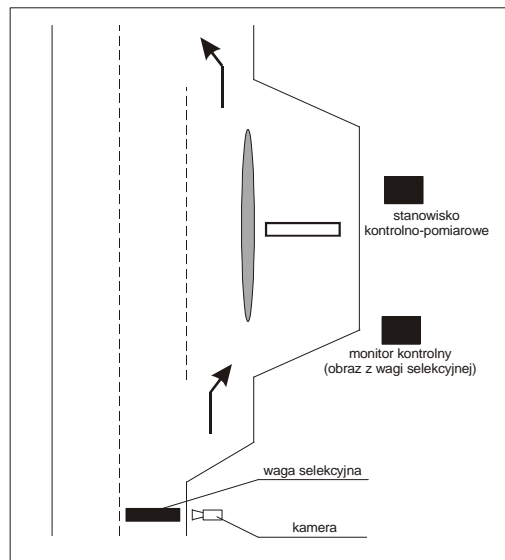
Dane o strukturze rodzajowej ruchu, a w szczególności pojazdów ciężkich, dostępne z pomiarów GPR (Generalnego Pomiaru Ruchu) dotyczą tylko liczby i typu pojazdu.

Natomiast do wyznaczenia współczynników przeliczeniowych sylwetek pojazdów na osie obliczeniowe 100 kN potrzebne są dodatkowo informacje o naciskach wywoływanych przez pojazd na nawierzchnię, za pośrednictwem poszczególnych osi zawieszenia. Dane tego typu można uzyskać m.in. ze stacji ważenia pojazdów w ruchu, w których rejestrowane są jednocześnie:

- sylwetka pojazdu,
- liczba osi rejestrowanego samochodu,
- naciski poszczególnych osi pojazdu,
- masę całkowitą.

W Polsce istnieje sześć stacji tego typu. Pod koniec roku 2003 stacje te, będące dotąd własnością GDDKiA zostały przekazane wojewodom, którzy z kolei włączyli je w stan wag posiadanych przez Inspekcję Transportu Drogowego. Stacje służą głównie do kontroli pojazdów o nienormalnych naciskach osi lub przekroczonych dopuszczalnych masach całkowitych. Kontrola odbywa się według następującego schematu (Rysunek 1):

- waga selekcyjna, umiejscowiona przed stanowiskiem kontrolnym (ok. 1 km), rejestruje poszczególne naciski osi składowych pojazdów ciężkich,
- kamera, umieszczona w pobliżu wagi selekcyjnej rejestruje obraz przejeżdżających przez wagę samochodów,
- informacje z wagi i kamery przekazywane są do monitora kontrolnego,
- osoba kontrolująca, na podstawie obserwacji obrazu na monitorze przekazuje informacje do osoby uprawnionej do zatrzymywania pojazdów o ewentualnych przekroczeniach przepisów przez pojazdy przejeżdżające przez wagę selekcyjną,
- pojazdy zatrzymane kieruje się na wagę stacjonarną, gdzie kontroluje się naciski osi i ciężar łączny samochodu z ładunkiem.



Rysunek 1 Schemat stanowiska pomiarowego do dynamicznego ważenia pojazdów

Na stacjach kontroli pojazdów wyposażonych w wagi selekcyjne i stacjonarne istnieje możliwość archiwizacji danych z ważenia pojazdów w pamięci komputera (podłączonego do wagi). Dane z wag selekcyjnych opracowywane są tylko w sposób statystyczny i dla określonych okresów czasu. Natomiast wartości obciążeń z wagi stacjonarnej można

wykorzystać do oszacowania współczynników przeliczeniowych. W analizach wykorzystano wyniki ważeń ze stacją kontroli pojazdów w Załuskach. Na stacji tej bardzo często dochodziło do uszkodzeń podzespołów związanych z wagą selekcyjną. Dlatego też sporadycznie była ona wykorzystywana do wyłapywania z potoku ruchu samochodów przeciążonych. Ze stacji tej korzystają również policjanci drogowi szkolący się w pobliskim Legionowie. Często więc nie inspektorzy lecz policjanci dokonują zatrzymania pojazdów, głównie w celach kontroli dokumentów przewozowych, czasu pracy kierowcy i stanu samochodu. Przy okazji, w celach szkoleniowych przeprowadza się również ważenie pojazdu na wadze stacjonarnej.

W wyniku analizy wartości nacisków osi skontrolowanych pojazdów podzielono dane na dwie grupy: dla pojazdów przeciążonych i dla pojazdów wykonujących transport zgodnie z przepisami o ruchu drogowym. Na stacji w Załuskach zważonych zostało ok. 600 pojazdów, z czego 146 było przeciążonych. Dzięki takiemu podziałowi można było w dalszej części analiz obliczyć średnie wartości agresywności różnych sylwetek pojazdów, a następnie, przy uwzględnieniu struktury ruchu i przyjętego procentowego udziału samochodów nienormatywnych w potoku ruchu, określić współczynniki przeliczeniowe.

4. Uwzględnienie wpływu dynamiki obciążeń na rzeczywiste naciski wywierane przez koła pojazdów na nawierzchnię drogową

Wpływ dynamicznego obciążenia nawierzchni przez ruch pojazdów ciężkich był już niejednokrotnie analizowany przez różne ośrodki badawcze. W 1995 roku grupa ekspertów OECD prowadziła duży program DIVINE [2]. Również w Polsce wykonywano na ten temat opracowania badawcze, m.in. w roku 1996 [3, 4]. Wyniki tych prac są ze sobą zbieżne i wykazują, że:

- zwiększenie o 10% wartości nacisku koła (w konstrukcji z pakietem warstw asfaltowych grubości ok. 16cm) powoduje wzrost wartości odkształcenia rozciągającego na spodzie warstw asfaltowych, w zależności od konstrukcji nawierzchni, o ok. 7 – 12 %,
- podczas ruchu pojazdów z niewielką prędkością, naciski kół na jezdnię znacząco nie zależą od typu i parametrów zawieszenia osi, lecz jedynie od masy pojazdu; pojazd o zwiększonej masie działa bardziej niszcząco na nawierzchnię,
- wraz ze zwiększeniem prędkości jazdy i nierówności nawierzchni wzrasta dynamiczne oddziaływanie kół pojazdów na drogę,
- zawieszenie pneumatyczne łagodzi dynamiczne oddziaływanie pojazdu na nawierzchnię drogi, objawia się to szybszym tłumieniem drgań, a w konsekwencji ma korzystny wpływ na trwałość nawierzchni,
- charakterystyka tłumienia w resorach pneumatycznych w okresie eksploatacji pojazdu jest praktycznie niezmienna w czasie, w przeciwieństwie do resorów piórowych, w których korozja może ją znacznie pogorszyć,
- nierówności nawierzchni drogi mogą spowodować nierównomierne rozłożenie nacisków pojazdu z zawieszeniem klasycznym na poszczególne koła osi do 20%, a z zawieszeniem pneumatycznym do 5%,
- na równych drogach, wzrost obciążeń w punktach koncentracji nacisków dynamicznych wynosi ok. 10%; na drogach nierównych efekt ten jest co najmniej dwukrotnie większy,

- koncentracja obciążeń dynamicznych wywołanych osi z zawieszeniem pneumatycznym jest o połowę mniejsza niż z zawieszeniem klasycznym, piórowym.

W badaniach OECD określono współczynniki zwiększające oddziaływanie ruchome dynamiczne w stosunku do obciążenia statycznego, z uwzględnieniem typu zawieszenia, równości drogi oraz prędkości ruchu. Przedstawiają się one następująco:

- dla nawierzchni równych:
 - dla pojazdów z zawieszeniem pneumatycznym 1,1 ÷ 1,15,
 - dla pojazdów z zawieszeniem klasycznym 1,3,
- dla nawierzchni nierównych:
 - dla pojazdów z zawieszeniem pneumatycznym 1,2,
 - dla pojazdów z zawieszeniem klasycznym 1,4 ÷ 1,5.

Naciski zarejestrowane na wagach stacjonarnych są wartościami obciążenia statycznego, ponieważ pomiar odbywa się przy powolnym przejeździe przez czujniki. Na drodze, należy jednak uwzględnić również dynamiczne oddziaływanie kół pojazdów będących w ruchu. Jak opisano powyżej jego wielkość zależy od równości nawierzchni i rodzaju zawieszenia pojazdu. Ponieważ współczynniki przeliczeniowe wykorzystywane będą do projektowania nowych dróg i wzmocnienia nawierzchni eksploatowanych, można przyjąć, że pojazdy (po wybudowaniu lub remoncie drogi) poruszały się będą po nawierzchni równej. Można więc przyjąć następujące współczynniki zwiększające oddziaływanie ruchome dynamiczne w stosunku do obciążenia statycznego:

- 1,1 dla zawieszenia pneumatycznego,
- 1,3 dla zawieszenia klasycznego.

Przyjmując z kolei stopniowe unowocześnianie taboru samochodów ciężarowych w Polsce założono, że pojazdów z zawieszeniem klasycznym będzie podobna liczba jak samochodów z zawieszeniem pneumatycznym. Wówczas współczynnik oddziaływania dynamicznego f_d wyniesie:

$$f_d = (1,1 + 1,3)/2 = 1,2$$

Naciski uzyskane z ważenia pojazdów, przemnożono więc przez współczynnik oddziaływania dynamicznego $f_d = 1,2$.

5. Uwzględnienie specyfiki oddziaływania na konstrukcję drogową koła pojedynczego i koła bliźniaczego

Badania programu DIVINE oraz wyniki analiz obliczeniowych wykonane m.in. w [5] wykazują, że zastosowanie kół bliźniaczych powoduje rozproszenie obciążenia przekazywanego na nawierzchnię. Stosowanie natomiast opon wąskich (tzw. super single) potęguje odkształcenia w konstrukcji, co w konsekwencji ma niekorzystny wpływ na trwałość nawierzchni. Postanowiono uwzględnić występowanie w niektórych sylwetkach pojazdów kół bliźniaczych, przez zastosowanie wyznaczonego w dalszej części przelicznika f_b . Udziału opon typu super single i ich wpływu na wielkość współczynników przeliczeniowych nie brano pod uwagę ze względu na trudności związane z ich identyfikacją w poruszających się pojazdach.

Analizie obliczeniowej poddano różnego typu konstrukcje nawierzchni drogowych, przeznaczonych głównie dla dróg o dopuszczalnym nacisku osi 100 kN. Obliczano

naprężenia i odkształcenia w konstrukcji wykorzystując program komputerowy ELSYM5M. Na podstawie przeprowadzonej analizy, w dalszych obliczeniach, w przypadku oceny agresywności oddziaływania osi z kołami bliźniaczymi stosowano współczynnik $f_b = 0,74$.

6. Obliczenie współczynników agresywności pojazdów zważonych

Nawierzchnia drogowa niszczona jest głównie przez ruch pojazdów ciężarowych. Naciski kół pojazdów inicjują powstawanie w konstrukcji naprężeń i odkształceń, które pojawiając się cyklicznie powodują zmęczenie materiału i w konsekwencji strukturalne zniszczenie nawierzchni. Wpływ zwiększenia obciążenia na zniszczenie zmęczeniowe materiału nawierzchni wyraża się wzorem:

$$N_i / N_j = (P_j / P_i)^\gamma \quad (1)$$

w którym:

N_i, N_j - trwałość zmęczeniowa, liczba obciążeń do zniszczenia,

P_i, P_j - obciążenie osi,

γ - wykładnik potęgi, wyrażający równoważność obciążenia osi.

W teście AASHO [6] współczynnik równoważności obciążeń wyznaczono 4. Do niedawna wartość ta była powszechnie stosowana, bez względu na materiał i konstrukcję nawierzchni. Późniejsze, liczne badania wykazały, że wzrost obciążenia ma różny wpływ na różne materiały. W wypadku nawierzchni półsztywnych, ze względu na zmęczenie podbudowy związanej cementem, spotyka się podawane w literaturze wartości nawet od 11 do 33. Francuski poradnik wymiarowania konstrukcji nawierzchni [7] podaje współczynnik agresywności obciążenia „A” w zależności od typu konstrukcji nawierzchni i układu obciążenia obliczany według wzoru:

$$A = K(P/P_0)^\alpha \quad (2)$$

ze współczynnikami K i α przyjmowanymi według Tablicy 1.

Bazując na danych z ważeń pojazdów oraz uwzględniając zwiększenie nacisków osi związanego z dynamiką ruchu obliczono współczynniki agresywności dla wszystkich zarejestrowanych samochodów ciężarowych. W analizach posługiwano się metodą proponowaną przez francuski poradnik wymiarowania konstrukcji nawierzchni, w którym współczynniki K i α przyjęto jak dla nawierzchni podatnych.

Tablica 1 Współczynniki K i α uwzględniające typ konstrukcji nawierzchni i układ obciążenia do obliczenia współczynnika agresywności obciążenia ruchem

Rodzaj nawierzchni	α	K		
		oś pojedyncza	oś podwójna	oś potrójna
Nawierzchnia asfaltowa, podatna	5	1	0,75	1,1
Nawierzchnia półsztywna	12	1	12	113
Nawierzchnia sztywna, betonowa:				
– płyty dyblowane	12	1	12	113
– ciągle zbrojona	12	1	?	?

7. Ustalenie struktury ruchu pojazdów ciężkich na podstawie pomiarów na odcinkach drogowych

Do wymiarowania konstrukcji nawierzchni, zarówno nowych jak i wzmacnianych, wykorzystuje się dane o ruchu pochodzące zazwyczaj z Generalnego Pomiaru Ruchu (GPR). Pomiarzy tego typu wykonuje się w Polsce co 5 lat. W pracy bazowano na GPR 2000 [8], w którym rejestrowanych było siedem kategorii pojazdów samochodowych (motocykle, samochody osobowe, samochody dostawcze, samochody ciężarowe bez przyczep i z przyczepami, ciągniki rolnicze i autobusy) oraz rowery i pojazdy zaprzęgowe.

Dane z ważeń pojazdów pozwalają na ustalenie współczynników agresywności różnych sylwetek pojazdów ciężkich. Jednak aby wyznaczyć wiarygodne wartości współczynników przeliczeniowych grup pojazdów potrzebne są również dane o liczebności różnych sylwetek pojazdów w ruchu drogowym (strukturze ruchu). Bazując na wynikach GPR 2000 ustalono procentowy udział samochodów ciężarowych z przyczepami i bez przyczep oraz autobusów w potoku pojazdów ciężkich, na wszystkich odcinkach spisowych dróg krajowych. Na tej podstawie wytypowano 12 reprezentatywnych odcinków drogowych charakteryzujących różne procentowe udziały grup pojazdów ciężkich. Na odcinkach tych przeprowadzono pomiar liczebności pojazdów ciężkich, w obu kierunkach ruchu łącznie, w podziale na występujące na polskich drogach sylwetki samochodów ciężarowych. Dodatkowo zapisywano, które osie pojazdów mają koła pojedyncze, a które bliźniacze.

8. Obliczenie średnich agresywności sylwetek pojazdów ciężkich

Każdej zidentyfikowanej na wadze sylwetce pojazdu przypisany został współczynnik agresywności, obliczony na podstawie danych o naciskach osi. Następnie, wykorzystując obliczony wcześniej współczynnik oddziaływania koła bliźniaczego f_b obliczono wartości współczynników agresywności sylwetek pojazdów, w zależności od konfiguracji osi z kołami pojedynczymi i bliźniaczymi. Analizy prowadzono zarówno na danych dla pojazdów przeciążonych jak i wykonujących transport zgodnie z przepisami.

Ponieważ w pomiarach rzeczywistych na drogach możemy spodziewać się pojazdów przeciążonych, należy uwzględnić ten fakt w obliczeniach średnich współczynników agresywności. W analizach przyjęto trzy poziomy liczby pojazdów przeciążonych: 10%, 15% i 20%.

9. Obliczenie współczynników przeliczeniowych

Współczynniki przeliczeniowe wyznaczono jako średnie ważone współczynników agresywności sylwetek samochodów ciężarowych. Wagą była liczba danych sylwetek w grupie pojazdów.

Ponieważ w danych, z których korzystano w analizie nie było wyników ważeń autobusów, obliczenia współczynników dla tej grupy pojazdów wykonano w inny sposób niż dla samochodów ciężarowych. Procedura obliczeń uwzględniała: rodzaj i liczbę zarejestrowanych w czasie badań na odcinkach drogowych autobusów, wagę autobusu oraz stopień wypełnienia pojazdu pasażerami i bagażem. Obliczony współczynnik przeliczeniowy wyniósł $r_3 = 0,778$.

Obliczone współczynniki przeliczeniowe zestawiono w Tablicy 2. W wartościach współczynników uwzględnione zostało przeciążenie pojazdów oraz podział na drogi o dopuszczalnym obciążeniu 10t i 11,5t. W Tablicy 3 podano współczynniki przeliczeniowe

obliczone dla przypadku, gdy z grupy pojazdów ciężarowych z przyczepami wyodrębnione zostaną ciągniki siodłowe z trzyosiową naczepą.

Tablica 2 Współczynniki przeliczeniowe na osie obliczeniowe 100 kN, wariant I

Współczynniki przeliczeniowe	Wartości współczynników przeliczeniowych, w zależności od udziału pojazdów przeciążonych					
	10%		15%		20%	
	PL	UE	PL	UE	PL	UE
r1	0,453	0,550	0,540	0,655	0,626	0,760
r2	1,379	1,815	1,532	2,014	1,685	2,213
r3	0,778	0,778	0,778	0,778	0,778	0,778

Tablica 3 Współczynniki przeliczeniowe na osie obliczeniowe 100 kN, wariant II

Współczynniki przeliczeniowe	Wartości współczynników przeliczeniowych, w zależności od udziału pojazdów przeciążonych					
	10%		15%		20%	
	PL	UE	PL	UE	PL	UE
r1	0,453	0,550	0,540	0,655	0,626	0,760
r2	1,493	2,001	1,648	2,209	1,803	2,416
r3	0,901	1,038	1,046	1,203	1,191	1,368
r4	0,778	0,778	0,778	0,778	0,778	0,778

Oznaczenia:

PL – drogi o dopuszczalnym nacisku osi 10t,

UE – drogi dostosowane do obciążeń według wymagań Dyrektywy 96/53/EC (11,5t).

10. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych analiz pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- obliczone wartości współczynników przeliczeniowych są wyższe od podanych w Katalogu [1]; szczególnie widać to w przypadku samochodów ciężarowych bez przyczep (wzrost 4-krotny); dla pozostałych dwóch grup pojazdów wzrost jest znacznie mniejszy – 10 ÷ 30%;
- uzasadnione jest wyodrębnienie z grupy pojazdów ciężarowych z przyczepami ciągników siodłowych z naczepą trzyosiową; pojazdy te stanowią ponad 80% całej grupy samochodów ciężarowych z przyczepami, wartości współczynników przeliczeniowych również znacznie od siebie odbiegają – o 66 ÷ 93% wyższe są współczynniki dla ciągników siodłowych z naczepą trzyosiową,
- na podstawie wykonanych w pracy obliczeń wskaźników agresywności można stwierdzić, że dla dróg które mają być dostosowane do wymagań Dyrektywy 96/53/EC należy przyjąć wyższe wartości współczynników przeliczeniowych,
- należy w większym stopniu wykorzystywać dane pochodzące z bezpośrednich pomiarów na wagach selekcyjnych; w tym celu konieczne jest zainstalowanie

kolejnych wag na drogach i wdrożenie systemu przesyłania danych do jednej, centralnej bazy, z której mogłyby korzystać osoby analizujące te dane w pracach badawczych, statystycznych i sprawozdawczych.

Obecnie w IBDiM prowadzona jest praca badawcza, której celem jest weryfikacja wartości współczynników przeliczeniowych, bazująca na Generalnym Pomiarze Ruchu z 2005 roku. Wykorzystana zostanie znacznie większa liczba wyników ważeń pojazdów, zarówno z wag stacjonarnych jak i z wag przewoźnych.

Bibliografia

1. *Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych*, IBDiM 1997
2. *Dynamic interaction of heavy vehicles with roads and bridges. OECD DIVINE Programme*. 1995
3. *Analiza dynamicznych obciążeń drogi przez pojazdy z zawieszeniem mechanicznym i zawieszeniem pneumatycznym. Symulacja komputerowa*. Politechnika Warszawska dla IBDiM. 1996
4. *Podsumowanie i wnioski dotyczące konsekwencji zwiększenia obciążenia tylnej osi pojazdu kołowego z 100 kN na 115 kN przy jednoczesnej zmianie zawieszenia osi z tradycyjnego na resorach wielopiórowych na pneumatyczne*. IBDiM. 1996
5. *Council Directive of 19 December 1984 (85/3/EEC) on weights, dimensions and certain other technical characteristics of certain road vehicles*
6. *Analiza wpływu obciążenia dróg przez pojazdy ciężkie na trwałość nawierzchni z uwzględnieniem stanu dróg w Polsce*. IBDiM na zlecenie Ministerstwa Infrastruktury. Warszawa 2004
7. *Highway Research Board. The AASHO Road Test. Pavement design research. Special report 61-E*. Washington D.C., 1962
8. *Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide technique*. LCPC, SETRA, 1994
9. *Ruch drogowy 2000*, Transprojekt-Warszawa 2001