

JÓZEF JUDYCKI¹⁾

PODSTAWY OKREŚLANIA WSPÓŁCZYNNIKÓW RÓWNOWAŻNOŚCI OBCIĄŻENIA OSI DO PROJEKTOWANIA NAWIERZCHNI DROGOWYCH

STRESZCZENIE.Praca przedstawia rys historyczny rozwoju charakterystyki obciążenia dróg przez ruch. Omówiono wpływ przyjęcia wielkości obciążenia standardowego osi równoważnej na wyniki analizy ruchu. Przedstawiono metodę doświadczalną AASHTO i współczynniki obliczone według tej metody w przypadku polskich warunków. Podano wzory do obliczeń współczynników dla osi podwójnych i potrójnych. Przedstawiono metodę francuską i jej porównanie z metodą AASHTO. Podano analizę wpływu przyjęcia wykładnika „n” od $n = 4$ do $n = 12$ na określenie ruchu równoważnego, przy różnym stopniu przeciążenia osi pojazdów. Zaproponowano podstawy teoretyczne określania współczynników równoważności osi według metod mechanistycznych. Podano przykłady wyznaczania współczynników ze wzorów zmęzeniowych. Pracę zakończono praktycznymi wnioskami.

1. WSTĘP

Współczynniki równoważności obciążenia osi są podstawą do projektowania nawierzchni drogowych. Od ich prawidłowego określenia zależy wiarygodność obliczenia ruchu projektowego i w konsekwencji projekt konstrukcji nawierzchni. Są także miarą agresywności oddziaływania osi na nawierzchnie drogowe. Jeżeli dany pojazd jest równoważny większej liczbie osi standardowych, to jest on bardziej agresywny dla nawierzchni.

¹⁾ prof. zw. dr hab. inż. – Zakład Budowy Dróg Politechniki Gdańskiej

Mimo długiego okresu stosowania w praktyce współczynników równoważności obciążenia osi, wciąż istnieją sprawy nie do końca poznane i zdefiniowane, a pewne istotne zagadnienia są wciąż otwarte. Do nich z pewnością zaliczyć można wielkość współczynników dla nawierzchni półsztywnych i sztywnych. W przypadku tych nawierzchni niepewna jest wartość wykładnika we wzorze na współczynnik równoważności obciążenia osi. Ponadto przy określaniu współczynników nie uwzględnia się w praktyce takich istotnych czynników, jak typ i rodzaj opon, rodzaj kół (pojedyncze, bliźniacze), ciśnienie kontaktowe, rodzaj zawieszenia (pneumatyczne, mechaniczne). Wreszcie istnieją uzasadnione wątpliwości co do ważności reguły Minera o liniowym sumowaniu się szkód zmęczeniowych w nawierzchni, która jest podstawą samej koncepcji współczynników równoważności.

Oprócz metod określania ruchu projektowego opartych ściśle o współczynniki równoważności obciążenia osi stosowane są inne praktyczne metody przeliczeń ruchu. Jedną z nich jest metoda przypisywania określonego współczynnika przeliczeniowego pewnym grupom pojazdów, stosowana min. w polskich katalogach. Inną jest metoda brytyjska, w której bierze się pod uwagę liczbę pojazdów ciężarowych (netto cięższych od 1,5 t) oraz uproszczoną charakterystykę ruchu i określa ruch projektowy w osiach standardowych 80 kN. W Niemczech od roku 2001, w jednej z metod stosuje się wzór 4-tej potęgi, a w drugiej oblicza się ruch w osiach standardowych o ciężarze 10 t na podstawie skorygowanego natężenia pojazdów ciężarowych (DTV). Również w jednej z metod Instytutu Asfaltowego ruch zastępczy w osiach 80 kN obliczany jest na podstawie liczby pojazdów ciężarowych i ich struktury, zależnej od rodzaju dróg. Jednak należy wyraźnie podkreślić, że podstawą teoretyczną i praktyczną tych wszystkich metod jest przeliczanie osi rzeczywistych o różnym obciążeniu na osie standardowe z wykorzystaniem współczynników równoważności obciążenia osi.

Niniejszy artykuł przedstawia rys historyczny rozwoju metod charakteryzowania ruchu drogowego w projektowaniu nawierzchni. Podaje podstawy umożliwiające określanie współczynników równoważności obciążenia osi według metod empirycznych i analitycznych. Przedstawia współczynniki według metod AASHTO, francuskiej i ich porównanie. Omawia zastosowanie metod mechanistycznych, które mają swoje ograniczenia, ale okazały się dobrym narzędziem do analizy współczynników równoważności obciążenia osi.

2. RYS HISTORYCZNY CHARAKTERYSTYKI OBCIĄŻENIA DRÓG PRZEZ RUCH

Próby zdefiniowania agresywności ruchu drogowego rozpoczęto na początku XIX wieku, w związku z pobieraniem myta przy przejazdach różnych pojazdów przez płatne mosty i drogi. Już w 1822 roku, w Wielkiej Brytanii, McAdam zaproponował, aby myto opłacane przez pojazdy było związane z ich wpływem niszczącym na drogi [1]. Problem polegał jednak na tym, że nie było wiadomo jak tę agresywność w praktyce zmierzyć.



W 1870 r. francuski Korpus Dróg i Mostów rozpoczął ocenę ruchu z uwzględnieniem jego wpływu na niszczenie dróg [1]. Zaproponował standardową jednostkę pojazdu drogowego w postaci tak zwanego „jednego zaprzęgu” (ściślej „1 collar = 1 chomąto”). „Jeden zaprzęg” oznaczał jeden załadowany pojazd zaprzęgnięty w jedno zwierze pociągowe. Pojazd zaprzęgnięty w parę koni był liczony jako „dwa zaprzęgi”. W 1904 roku, motocykle liczono jako 0,3 „zaprzęgu”, pojazdy samochodowe poruszające się z prędkością do 30 km/h liczono jako „jeden zaprzęg”, a pojazdy poruszające się z prędkością większą od 30 km/h liczono jako „dwa zaprzęgi”.

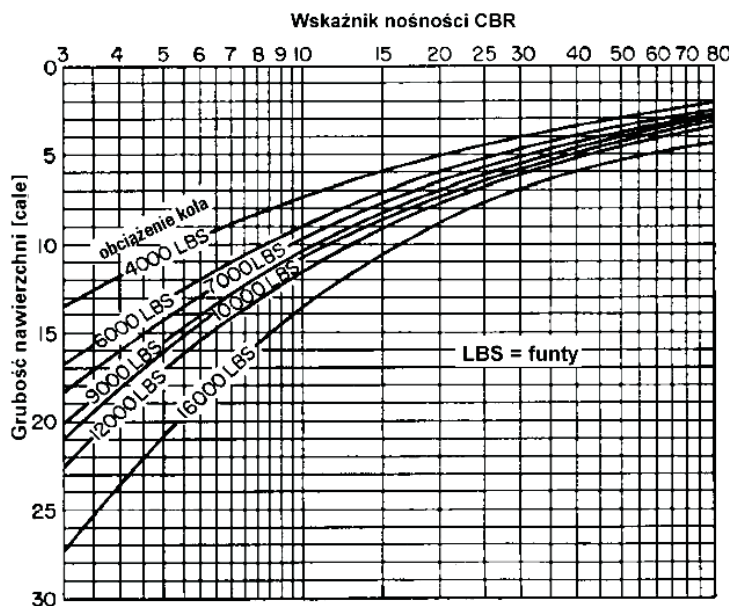
System francuski zaadoptowano w Wielkiej Brytanii, ale zamiast „jednego zaprzęgu” wprowadzono „jedną tonę angielską” jako jednostkową miarę ruchu. Powozom zaprzężonym w parę koni przypisano 3 tony, konnym pojazdom ciężkim o obręczach stalowych przypisano 8 ton, a pojazdom drogowym o napędzie parowym 12 ton. Podobną klasyfikację, opartą o średni ciężar pojazdu, wyrażony w tonach, podjęło w USA Biuro Dróg Publicznych (Office of Public Roads) w 1915 r. [1]: 0,3 tony przypisano powozom konnym o kołach gumowych, a 2 tony samochodom.

Praktycznie przez całą pierwszą połowę XX wieku, aż do Testu AASHO, problem definiowania obciążenia dróg przez pojazdy nie został skutecznie rozwiązany. Nawierzchnie drogowe projektowano według takiej samej koncepcji jak inne konstrukcje inżynierskie. Konstrukcję nawierzchni dobierano tak, aby wytrzymała one największe obciążenie, jakie mogło w czasie eksploatacji wystąpić. Było to stosunkowo proste w przypadku nawierzchni betonowych. W 1926 r. Westergaard opracował teorię płyt sprężystych na podłożu Winklera [2]. Płyty betonowe projektowano tak, aby naprężenia od największego obciążenia koła nie przekraczały naprężeń dopuszczalnych dla betonu, z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa. Taka technika projektowania występuje do dzisiaj w niektórych metodach dla nawierzchni lotniskowych, a także dla nawierzchni portowych i terminali kontenerowych, gdzie bardziej liczy się wielki ciężar obciążenia koła lub zestawu kół niż liczba powtarzalnych obciążeń. Obecnie sytuacja uległa jednak zdecydowanej zmianie w projektowaniu betonowych nawierzchni drogowych, gdzie uwzględniane są efekty zmęczenia materiału wskutek wielokrotnych obciążeń.

Sprawa była bardziej skomplikowana w przypadku nawierzchni podatnych, czyli nawierzchni asfaltowych na podbudowach z kruszyw. W przypadku tych nawierzchni nie było prostej i odpowiedniej teorii. Trudno też było zdefiniować moment ich zniszczenia i obciążenie niszczące. W rzeczywistości nawierzchnie asfaltowe nigdy nie pękają od razu od wielkiego pojedynczego obciążenia, ale ulegają stopniowej degradacji w czasie od rosnącego ruchu. W pierwszej, szerzej znanej metodzie CBR [3] przyjęto, że tak należy dobrać grubość nawierzchni, aby naprężenie pionowe przekazywane na podłoże gruntowe było mniejsze niż naprężenia dopuszczalne. W 1941 r. Zarząd Dróg w Kalifornii opracował krzywą projektową (zależność grubości nawierzchni od CBR) dla obciążenia koła 3,17, dla ruchu lekkiego oraz 5,44 tony dla ruchu ciężkiego [3]. Następnie opracowano nomogramy doboru grubości warstw w zależności od CBR gruntu i różnorodnego obciążenia obliczeniowego koła (rys. 1). Przy projektowaniu dróg obciążenie obliczeniowe koła dobierano w zależności od wielkości ruchu, ale



sprawa ta nie została całkowicie wyjaśniona i uzasadniona. Podobne krzywe wprowadzono potem w lokalnych modyfikacjach metody CBR, np.: w szwajcarskiej metodzie projektowania [4]. W brytyjskiej metodzie CBR wprowadzono krzywe projektowe dla różnych typów dróg, w zależności od liczby pojazdów komercyjnych, które miały ciężar własny, bez ładunku, większy od 1,5 tony [5].



Rys.1. Zależność grubości nawierzchni od CBR i obciążenia osi wprowadzona w USA w 1953 r [9]

Fig.1. Relationship between pavement thickness, CBR - value and axle load, introduced in USA in 1953 [9]

Jak wynika z pracy Stefana Rolli [4], w latach 50-tych ubiegłego stulecia w Polsce typ nawierzchni przyjmowano w zależności od obciążenia ruchem wyrażonego w tonach brutto na dobę: nawierzchnia ulepszona ciężka powyżej 5 000 ton, średnia 2 500 ÷ 5 000 ton, lekka poniżej 2 500 ton. Ten sposób zachował się do lat 70-tych jako uzupełniająca miara obciążenia dróg ruchem w polskich metodach projektowania nawierzchni PJ-IBD i CBR [6].

Według [4] w ZSRR w 1954 r. wprowadzono instrukcje projektowania nawierzchni [7], gdzie dla dróg związkowych przyjęto tzw. schemat obciążenia $N-8$, a jako koło obliczeniowe przyjęto 3 tony, ciśnienie kontaktowe 0,5 MPa i średnicę śladu zastępczego $D = 27,5$ cm. Było to być może pierwsze w świecie wprowadzenie pojęcia „standardowego koła obliczeniowego”. Prof. Iwanow opracował wówczas wzór na przeliczanie ilości pojazdów o różnym obciążeniu koła na pojazd o standardowym obciążeniu koła (wtedy 3 tony) [4]:

$$\eta = K_2 / K_1 = (p_2 D_2 / p_1 D_1) = (a + b \log N_1) / (a + b \log N_2) \quad (1)$$



gdzie:

- p_1, p_2 – ciśnienie kontaktowe,
- D_1, D_2 – średnice śladów zastępczych,
- N_1, N_2 – natężenie ruchu,
- K_1, K_2 – współczynniki bezpieczeństwa,
- a, b – współczynniki doświadczalne.

Indeksy „1” i „2” dotyczą odpowiednio pojazdów dowolnych i pojazdu wzorcowego, o ciężarze 3 ton na koło. Wzór Iwanowa (1) wynikał z dwóch przesłanek. Po pierwsze udowodniono, że niszczące działanie ruchu jest proporcjonalne do logarytmu z liczby obciążeń „logN” i współczynnik bezpieczeństwa przy projektowaniu powinien wynosić:

$$K = a + b \log N, \quad (2)$$

gdzie: dla stref objętych działaniem mrozu $a = 0,5$ i $b = 0,65$. Po drugie przyjęto, że miarą niszczącego oddziaływania obciążenia koła jest iloczyn „ $p_i D_i$ ”, a do przeliczania różnych pojazdów można wykorzystać stosunek η , określony wzorem (1).

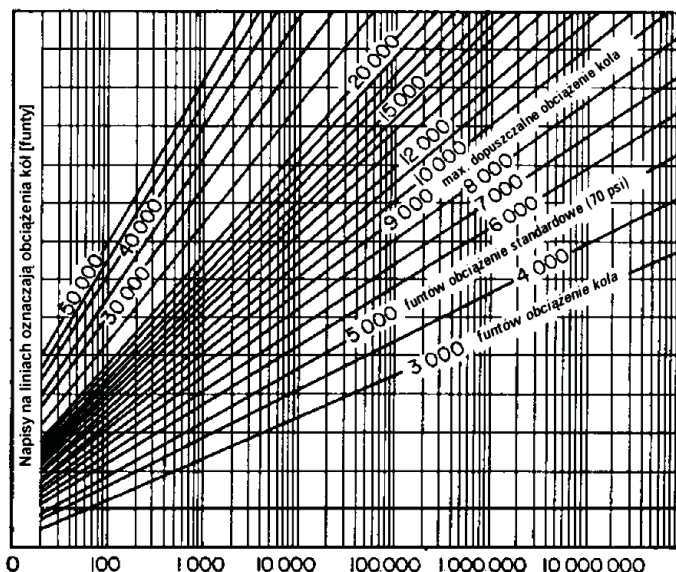
Przekształcony wzór z instrukcji radzieckiej z 1954 r. [6] zastosowano w Polsce, w katalogu typowych nawierzchni, wprowadzonym w 1977 r i zmienionym dopiero w 1997 r. [7]. Wzór w starym polskim katalogu miał następującą postać:

$$\log N_{por} = (0,77 p_i D_i) / 170 + (p_i D_i \log N_i) / 170 - 0,77. \quad (3)$$

We wzorze przyjęto dla koła standardowego 40 kN iloczyn $pD = 170 \text{ kg/cm}$, dla $p = 5,7 \text{ kg/cm}^2$ i $D = 30 \text{ cm}$. Katalog ten i wzór przestały obowiązywać w Polsce dopiero w 1997 r. Jak widać zmiany zachodziły wolno!

Kilka lat po wejściu w życie metody projektowania ZSRR, w 1958 r. w Kalifornii wprowadzono metodę projektowania nawierzchni Hveema-Carmana [1] oraz [3]. W metodzie tej wprowadzono korektę modyfikującą projektowaną grubość nawierzchni ze względu na oczekiwany ruch ciężkich pojazdów. Wiązało się to z przeliczeniem ruchu rzeczywistego na liczbę równoważnych obciążeń kół. Użyto wówczas chyba po raz pierwszy w języku angielskim pojęcia „Equivalent Wheel Load - EWL” - „równoważne obciążenie koła” i „Traffic Index” - „wskaźnik ruchu”. Jako obciążenie koła równoważnego przyjęto 5000 funtów (2268 kG) i ciśnienie 70 psi (0,5 MPa). Koła rzeczywiste zamieniano na równoważne stosując zależność logarytmiczną. Opracowano nomogram do przeliczania kół o różnym obciążeniu na koła równoważne (rys. 2). Aby według tej metody wyznaczyć liczbę kół równoważnych o ciężarze 5000 funtów, należy znaleźć przecięcie linii ukośnej reprezentującej rzeczywiste obciążenie koła z linią pionową reprezentującą liczbę obciążeń tego koła. Od tego punktu przecięcia należy pójść poziomo do linii ukośnej 5000 funtów i w tym miejscu na linii pionowej odczytać liczbę osi równoważnych.





Rys.2. Nomogram do zamiany liczby kół rzeczywistych na równoważne (5 000 funtów) według metody Carmana-Hveema z Kalifornii (1958), wg [3]

Fig.2. Nomograph to replace number of real axle loads into equivalent (5 000 pounds) according to Carman-Hveem method from California (1958), [3]

W latach 1958-60 stowarzyszenie American Association of State Highway Officials przeprowadziło test drogowy, tzw. AASHO Road Test, w miejscowości Ottawa, w stanie Illinois [8, 9]. Były to jak dotąd największe w świecie badania konstrukcji nawierzchni w pełnej skali na specjalnie wybudowanych drogach (pętach) doświadczalnych. Wybudowano sześć pętli z nawierzchniami betonowymi i asfaltowymi, o różnych grubościach warstw. Badania wykonano przy użyciu specjalnych pojazdów z osiami pojedynczymi i podwójnymi, przy różnych ciężarach osi. 200 specjalnych pojazdów poruszało się po tych nawierzchniach z prędkością 35 mil/h (56,3 km/h), 19 godzin na dobę, przez dwa lata, do osiągnięcia 1,1 miliona obciążeń standardowych 80 kN na każdej sekcji, o ile nie uległa ona wcześniej zniszczeniu. Największym osiągnięciem tego testu było zdefiniowanie trzech pojęć:

- Equivalent Standard Axle – standardowa oś równoważna,
- Equivalent Axle Load Factor – współczynnik równoważności obciążenia osi,
- Present Serviceability Index – wskaźnik oceny przydatności nawierzchni.

Wersję wstępną metody AASHO opublikowano w 1961 r., a zrewidowaną w 1973 r. [8, 9]. Przyjęto, że dowolny ruch drogowy można wyrazić w postaci określonej liczby standardowych osi równoważnych, albo w „Equivalent Standard Axle Loads”, w skrócie w „ESALs”. Wprowadzenie po Teście AASHO pojęcia „ESAL – standardowej osi równoważnej” było jednym z największych osiągnięć w projektowaniu nawierzchni i znakomicie ułatwiło i uprościło proces projektowania. Można więc



zrozumieć Cebona [1], który określa ESAL, jako „Holy Grail”, poszukiwany przez inżynierów drogowych przez ponad stulecie. Od tego czasu ruch drogowy rozpoczęto przeliczać na ruch zastępczy (równoważny) wyrażony w standardowych osiach równoważnych, zwanych czasami w Polsce „osie zastępczymi” lub „osiami obliczeniowymi”.

Wkrótce po wprowadzeniu w USA pojęcia standardowej osi równoważnej weszło ono do praktyki w wielu krajach świata. W Polsce wyniki Testu AASHO były wtedy znane, ale dalej operowano pojęciem „samochodu porównawczego N_{por} o obciążeniu 80 kN/oś”, zarówno we wszystkich stosowanych w latach 1970-1997 metodach projektowania PJ-IBD, CBR i OSŻD [6], jak i w starym katalogu, obowiązującym w latach 1976 – 1997 [10]. Był to dziwny pojazd, bo miał ściśle określoną tylko jedną oś – 80kN, a o pozostałych jego osiach nie było mowy! Był to pewien relikw systemu wprowadzonego dużo wcześniej do projektowania nawierzchni w ZSRR [7].

Nie wszędzie koncepcja równoważnej osi standardowej weszła szybko do praktycznego stosowania. Poprzednie wytyczne niemieckie RSTO 86 z 1986 r nie posługiwały się pojęciem osi standardowej 80 kN, ale klasyfikowały ruch według „miarodajnego liczbowego wskaźnika obciążenia ruchem (VB)” – „Massgebende Verkerhrbelastungszahl”, który oparty był o dobowe natężenie pojazdów ciężarowych (DTV), skorygowane ze względu na przyrost ruchu, liczbę pasów ruchu na jezdni, ich szerokość i wzniesienia w profilu podłużnym drogi [11]. W Niemczech dopiero w ostatnim wydaniu wytycznych projektowania RSTO 01 z 2001 r. [12] wprowadzono klasyfikację ruchu ze względu na liczbę obciążeń osi standardowych o ciężarze 10 ton.

Można powiedzieć, że ostatnio historia zatoczyła koło. Najnowsza metoda AASHTO 2002 [13], opublikowana w 2004 r., odeszła od przeliczania ruchu rzeczywistego na ruch zastępczy w osiach standardowych ESAL's na rzecz wprowadzania do systemu obliczeniowego dość złożonego zbioru danych o ruchu rzeczywistym. Autorzy AASHTO 2002 doszli do wniosku, że ESAL's to zbyt duże uproszczenie.

3. STANDARDOWA OŚ RÓWNOWAŻNA „EQUIVALENT STANDARD AXLE”

W Teście AASHO, w latach 1958-60 przyjęto, że standardowa oś równoważna jest to oś pojedyncza o nacisku 18 kilofuntów (kips) = 18 000 funtów. Od tego czasu, zarówno w USA, jak i w wielu innych krajach świata przyjmuje się takie obciążenie osi równoważnej. 18 kips to 8,16 tony metrycznej albo 80,1 kN i dlatego w Europie za standardową oś równoważną przyjęto uważać oś o nacisku 8 ton, albo w układzie SI – 80 kN.

Na początku należy wyjaśnić pewne niekonsekwencje w jednostkach używanych do miary obciążenia osi w Europie. Jedni definiują ją w kN, a inni w tonach. Dyrektywa 96/53/EC [14] Unii Europejskiej z 1996 r podaje dopuszczalne ciężary osi i pojazdów drogowych (dosłownie „weights”) w tonach (np.: 11,5 tony dla osi pojedynczej). Standardowe obciążenie osi w Niemczech podano także jako 10 ton [12]. Ale Francuzi



podają obciążenie osi standardowej jako 130 kN [15], a Brytyjczycy jako 80 kN [14]. Wymagania polskie dotyczące nacisków na osie pojazdów określone są w kN. Autor będzie używał dalej jednostek systemu SI – kN.

W okresie powstawania koncepcji „standardowej osi równoważnej”, na początku lat 1960-tych, 18 000 funtów (80,1 kN) było maksymalnym obciążeniem osi pojedynczej dopuszczalnym w większości stanów USA. Później, w 1975 roku, w 26 stanach USA dopuszczalne obciążenie maksymalne osi pojedynczej wynosiło 18 000 funtów, a w pozostałych 25 stanach wynosiło od 20 000 do 22 400 funtów (od 89 do 99,7 kN) [9]. Obecnie w USA [17] obowiązują wyższe limity obciążenia osi. Według przepisów federalnych obowiązujących w 2002 r. obciążenie dopuszczalne osi pojedynczej, na drogach międzystanowych należących do Interstate Highway System, wynosiło 20 000 funtów (89,0 kN), a osi podwójnej 34 000 funtów (151,3 kN). Na drogach 12 stanów obowiązywały większe limity obciążenia na osie pojedyncze, równe od 20 340 funtów (90,5 kN) do maksymalnie 22 500 funtów (100,1 kN). Maksymalne obciążenie 100,1 kN jest obowiązujące w trzech stanach (Connecticut, Hawaje i Massachusetts). Tylko w jednym stanie, w Minnesocie, ale tylko na drogach stanowych, pozostał nacisk „standardowy” osi 18 000 funtów (80,1 kN). Pomimo faktu, że dopuszczalne ciężary osi w USA wzrosły z 18 000 do co najmniej 20 000 funtów „standardową osią równoważną” jest wciąż oś 18 000 funtów, czyli 80,1 kN. Jak widać w USA dbają o nawierzchnie i ograniczają obciążenia osi.

Pojęcie „standardowej osi równoważnej” adoptowano w reszcie świata. Początkowo w wielu krajach Europy, w tym w również w Polsce wprowadzono, wzorem USA ciężar standardowej osi równoważnej równy 80 kN. W późniejszych latach, w związku ze wzrostem dopuszczalnych ciężarów osi pojazdów, przyjęto w Europie większe obciążenia dla standardowej osi równoważnej. Obecnie spotkać można następujące obciążenia standardowych osi równoważnych:

- Wielka Brytania 80 kN,
- Polska 100 kN i 115 kN,
- Austria 100 kN,
- Niemcy 100 kN,
- Francja 130 kN.

Czy przyjęte obciążenie standardowej osi równoważnej musi być równe maksymalnemu dopuszczalnemu obciążeniu osi? Jak widać z praktyki nie musi. Przykładem są USA, gdzie dopuszczalne ciężary osi w różnych stanach wzrosły od 80 kN do 89 kN, a nawet do 100 kN, a standardową osią równoważną jest od 1973 r wciąż 80 kN. W USA termin „ESAL”, czyli „Equivalent Standard Axle Load” od lat oznacza bez zmiany 18 000 funtów = 80,1 kN. Podobnym przykładem jest Wielka Brytania, gdzie dopuszczalne ciężary osi pojedynczych wzrosły początkowo od 80 kN do 105 kN, a od 1999 r nawet do 115 kN, a ciężar standardowej osi równoważnej nie zmienił się i wynosi wciąż 80 kN. W Niemczech maksymalny nacisk na oś to 115 kN, a oś standardowa to 100 kN. Jak widać, w wielu krajach występuje w tym przypadku pewien dualizm. Ale, na przykład we Francji występuje pełna zgodność, maksymalny nacisk na oś to 130 kN, a oś standardowa to również 130 kN.

Czy dualizm ten to praktyka w pełni prawidłowa, czy też jest to efekt przywiązania do tradycji? Czy przyjęcie określonego obciążenia osi standardowej nie ma wpływu na wynik projektowania nawierzchni? Na to pytanie jest dość trudno jednoznacznie odpowiedzieć. Przyjmijmy założenie stanu idealnego, takiego że istnieje możliwość dokładnego i łatwego przeliczenia liczby osi o różnych ciężarach, na osie standardowe. Załóżmy, że dokładnie można przeliczyć osie 80 kN na 100 kN, lub na 115 kN czy na 130 kN, i odwrotnie. W takim przypadku przyjęcie dowolnego obciążenia osi standardowej (80, 100 albo 115 kN) byłoby bez istotnego znaczenia. W stanie idealnym ciężar osi równoważnej nie musiałby być równy maksymalnemu dopuszczalnemu obciążeniu osi i nie wpłynęłoby to niekorzystnie na efektywność systemu projektowania nawierzchni. Należałoby tylko odpowiednio dobrać liczbę osi standardowych do projektowania, aby zapewnić nośność i trwałość nawierzchni w okresie projektowym. W praktyce są jednak pewne trudności w dokładnym przeliczaniu osi o różnym obciążeniu, zwłaszcza w przypadku nawierzchni półsztywnych i sztywnych. Wśród specjalistów nie ma pełnej zgodności co do wielkości współczynników przeliczeniowych dla tych nawierzchni. Z doświadczenia autora wynika, że przyjęcie różnych obciążeń osi do obliczania nawierzchni według metod mechanistycznych może dawać nieco różne wyniki, a różnice są mniejsze dla nawierzchni o podbudowach podatnych, a większe i dość istotne dla nawierzchni o podbudowach związanych cementem. W przekonaniu autora przy projektowaniu nawierzchni typu ciężkiego betonowych i półsztywnych lepiej jest przyjmować do obliczeń obciążenie osi równoważnej równe dopuszczalnemu obciążeniu osi. Tego typu nawierzchnie są bardziej od podatnych wrażliwe na duże i wielokrotne przeciążenia. Z drugiej strony czynniki praktyczne przemawiają za przyjęciem jednakowej osi standardowej w wielu krajach. Można wtedy korzystać wprost z wyników badań, analiz i metod obliczeniowych pochodzących z zagranicy. Tym zapewne uzasadnić można pozostawienie osi standardowej 80 kN w USA, w Wielkiej Brytanii i w wielu innych krajach świata, mimo zwiększenia realnych obciążeń osi pojazdów.

4. WSPÓŁCZYNNIK RÓWNOWAŻNOŚCI OBCIĄŻENIA OSI „EQUIVALENT AXLE LOAD FACTORS”

Przeliczanie liczby wszystkich osi rzeczywistych, o różnych ciężarach na równoważną liczbę standardowych osi równoważnych odbywa się według wzoru:

$$N_s = F_j \cdot N_j , \quad (4)$$

gdzie:

N_s – liczba osi standardowych odpowiadająca N_j osiom rzeczywistym,

N_j – liczba osi rzeczywistych o określonym nacisku j -tym,

F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi.



Równoważność osi oznacza, że N_s standardowych osi równoważnych powoduje takie samo destrukcyjne oddziaływanie na konstrukcję nawierzchni jak N_j osi rzeczywistych o określonym nacisku j -tym.

Współczynnik równoważności obciążenia osi F_j jest współczynnikiem przeliczeniowym z osi rzeczywistych na standardowe osie równoważne. Na przykład, jeżeli współczynnik równoważności danej j -tej osi rzeczywistej $F_j = 4$, to taka oś ma 4-krotnie większe oddziaływanie niszczące na nawierzchnię niż oś standardowa. Jeżeli dla innej osi rzeczywistej $F_j = 0,5$, to oddziaływanie niszczące takiej osi jest dwukrotnie mniejsze niż osi standardowej.

Wyróżnić można dwie grupy metod określania współczynnika równoważności osi F_j : analityczne i doświadczalne, które zostaną kolejno omówione.

5. METODA DOŚWIADCZALNA AASHTO

Metoda projektowania nawierzchni AASHTO była pierwszą metodą²⁾, w której wprowadzono doświadczalne współczynniki równoważności osi. W ramach Testu AASHTO przeprowadzono w USA, w miejscowości Ottawa w stanie Illinois, na przełomie lat 1950-60 największe jak dotąd w świecie badania konstrukcji nawierzchni na specjalnie wybudowanych pętach doświadczalnych. Badania wykonano przy użyciu pojazdów z osiami pojedynczymi i podwójnymi, przy różnych ciężarach osi. Efektem tych badań było między innymi określenie następujących skomplikowanych wzorów empirycznych umożliwiających obliczenie współczynnika równoważności obciążenia osi „Equivalent Axle Load Factor ($F_j = EALF$)” [18]:

$$EALF = \frac{W_{t18}}{W_{tx}}, \quad (5)$$

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4,79 \cdot \log(18 + 1) - 4,79 \cdot \log(L_x + L_2) + 4,33 \cdot \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}, \quad (6)$$

$$G_t = \log\left(\frac{4,2 - P_t}{4,2 - 1,5}\right), \quad (7)$$

$$\beta_x = 0,40 + \frac{0,081(L_x + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} L_2^{3,23}}, \quad (8)$$

gdzie:

W_{tx} – liczba przyłożonych obciążeń osi- x w czasie t ,

²⁾ W 1961 r. opublikowano po raz pierwszy AASHTO Interim Design Guide [9], zrewidowany następnie w latach 1973 [8], 1983, 1993 [19]. Obecnie wdraża się na najnowszą wersję metody AASHTO [13]. Nazwa AASHTO uległa zmianie na AASHTO (z American Association of State Highway Officials na American Association of State Highway and Transportation Officials)

- W_{18} – liczba przyłożonych obciążeń 18 000 funtów (18 kip = 80,1 kN) standardowych osi w czasie t ,
- L_x – obciążenie w kip-ach na oś pojedynczą, na zestaw osi podwójnych (osie tandemowe) i potrójnych (osie tridemowe),
- L_2 – kod osi: 1 dla osi pojedynczej, 2 dla osi tandemowej, 3 dla osi tridemowej; SN jest liczbą strukturalną, która jest funkcją grubości i modułów sprężystości każdej warstwy konstrukcji nawierzchni i warunków gruntowowodnych w podłożu,
- p_t – wskaźnik PSI (*Present Serviceability Indem*) na końcu okresu obliczeniowego nawierzchni (tzw. „wskaźnik terminalny przydatności eksploatacyjnej”),
- G_t – funkcja p_t ,
- β_x – funkcja zmiennych projektowych i zmiennych obciążenia, która wpływa na kształt zależności przydatności eksploatacyjnej rozpatrywanej nawierzchni p względem ilości obciążeń osi W ,
- β_{18} – jest wartością β_x , kiedy L_x jest równe 18 i L_2 jest równe 1.

Postać funkcji dla nawierzchni betonowych jest podobna.

W metodzie AASHTO określono współczynnik równoważności obciążenia osi jako funkcję następujących czynników:

- ciężaru osi rozpatrywanej,
- ciężaru osi standardowej,
- rodzaju osi (pojedyncza, podwójna),
- założonego stopnia zniszczenia nawierzchni na końcu planowanego okresu eksploatacji; przyjęto stopień zniszczenia określony wartością $p_t = 2,5$ albo $p_t = 2$; p_t oznacza terminalną wartość wskaźnika PSI, na końcu planowanego okresu eksploatacji: definicję PSI i p_t podano w wielu publikacjach [8, 18, 20, 25],
- konstrukcji nawierzchni czyli grubości płyty betonowej, albo liczby strukturalnej nawierzchni podatnej SN ; liczba strukturalna jest sumą iloczynów współczynników materiałowych A_i i grubości warstw D_i wyrażonych w calach.

Jak widać, współczynniki równoważności osi w metodzie AASHTO zależą nie tylko od obciążenia rozważanej osi, ale także od rodzaju konstrukcji nawierzchni (podatna, sztywna) oraz od grubości warstw nawierzchni i wytrzymałości materiału, z którego wykonano nawierzchnię. Efekt wpływu nawierzchni jest jednak drugorzędny w porównaniu z efektem obciążenia rozpatrywanej osi.

Współczynniki równoważności obciążenia osi dla obciążeń wyrażonych w funtach i osi standardowej 18 kip (80,1 kN), według metody AASHO przedstawiają książki Yodera i Witczaka [9] Huanga [18] oraz metoda AASHTO z 1993 r. [19]. Mniejsze wyciągi z tablic AASHO podał w języku polskim Rolla w pracy [20].



Dane AASHTO podawane są w funtach. Aby ułatwić korzystanie z tej metody w Polsce autor wraz z współpracownikami zastosowali wzory AASHTO do obliczenia współczynników dla polskich konstrukcji nawierzchni, według ostatniego katalogu z 1997 r. [21], z obciążeniami osi w kN i dla osi standardowej 80 kN i 100 kN. Liczbę strukturalną $SN = 5,15$ przyjęto jak dla konstrukcji podatnej KR4. Przyjęto terminalny wskaźnik przydatności eksploatacyjnej $PSI - p_t = 2,5$, jak dla dróg głównych. Wyniki dla osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych według pracy [22] przedstawia tablica 1. W pracy [22] autor i współpracownicy przedstawili obliczenia dla większości konstrukcji z nowego polskiego katalogu, dla różnych wartości SN . Zauważyć było można, że wpływ liczby strukturalnej (inaczej grubości konstrukcji) występuje, ale nie jest nadmiernie duży.

Tablica 1. Wyniki obliczeń współczynników równoważności obciążenia osi wg wzorów AASHTO dla polskiej konstrukcji nawierzchni z katalogu z 1997 r. (podbudowa z kruszywa łamanego, KR4, $SN = 5,15$, $p_t = 2,5$) wg [22]
Table 1. Results of calculation of equivalent axle load factors from the AASHTO formulas for the pavement structure from the Polish catalogue from 1997 (granular unbound base course, KR4, $SN = 5$, $p_t = 2,5$) [22]

Naciski osi [kN]	Typ osi					
	pojedyncza		podwójna		potrójna	
	współczynniki F_j dla obciążenia równoważnej osi standardowej					
	80 kN	100 kN	80 kN	100 kN	80 kN	100 kN
5	0,00003	0,00001				
10	0,00026	0,00011				
15	0,00108	0,00045				
20	0,00322	0,00135				
25	0,00782	0,00327				
30	0,01648	0,00690				
35	0,03131	0,01311				
40	0,05491	0,02300				
45	0,09038	0,03785	0,00705	0,00295		
50	0,14123	0,05915	0,01075	0,00450		
55	0,21131	0,08850	0,01585	0,00664		
60	0,30470	0,12761	0,02267	0,00949	0,00534	0,00223
65	0,42560	0,17824	0,03160	0,01323	0,00731	0,00306
70	0,57823	0,24216	0,04306	0,01804	0,00982	0,00411
75	0,76675	0,32111	0,05754	0,02410	0,01296	0,00543

Naciski osi [kN]	Typ osi					
	pojedyncza		podwójna		potrójna	
	współczynniki F_i dla obciążenia równoważnej osi standardowej					
	80 kN	100 kN	80 kN	100 kN	80 kN	100 kN
80	1,00000	0,41680	0,07553	0,03163	0,01684	0,00705
85	1,26763	0,53088	0,09760	0,04087	0,02158	0,00904
90	1,58786	0,66499	0,12432	0,05207	0,02732	0,01144
95	1,95989	0,82080	0,15633	0,06547	0,03418	0,01431
100	2,38779	1,00000	0,19427	0,08136	0,04232	0,01772
105	2,87591	1,20442	0,23881	0,10001	0,05189	0,02173
110	3,42897	1,43605	0,29066	0,12173	0,06308	0,02642
115	4,05219	1,69705	0,35053	0,14680	0,07606	0,03185
120	4,75133	1,98985	0,41913	0,17553	0,09102	0,03812
125	5,53284	2,31714	0,49718	0,20822	0,10816	0,04530
130	6,40386	2,68192	0,58543	0,24518	0,12768	0,05347
135	7,37228	3,08749	0,68459	0,28670	0,14981	0,06274
140	8,44676	3,53748	0,79538	0,33310	0,17477	0,07319
145	9,63675	4,03585	0,91852	0,38467	0,20279	0,08493
150	10,95250	4,58688	1,05470	0,44171	0,23410	0,09804
155	12,40506	5,19521	1,20463	0,50450	0,26895	0,11264
160	14,00626	5,86579	1,36898	0,57333	0,30759	0,12882
165	15,76876	6,60392	1,54844	0,64848	0,35026	0,14669
170	17,70602	7,41524	1,74367	0,73025	0,39723	0,16636
175	19,83230	8,30572	1,95536	0,81890	0,44874	0,18793
180	22,16268	9,28168	2,18417	0,91473	0,50506	0,21152
185	24,71306	10,34977	2,43079	1,01801	0,56645	0,23723
190	27,50016	11,51701	2,69591	1,12904	0,63317	0,26517
195	30,54157	12,79074	2,98023	1,24811	0,70547	0,29545
200	33,85570	14,17869	3,28450	1,37554	0,78361	0,32818
205	37,46183	15,68893	3,60947	1,51164	0,86786	0,36346
210	41,38011	17,32990	3,95593	1,65674	0,95847	0,40140
215	45,63159	19,11041	4,32472	1,81118	1,05568	0,44212
220	50,23821	21,03965	4,71670	1,97534	1,15977	0,48571



Naciski osi [kN]	Typ osi					
	pojedyncza		podwójna		potrójna	
	współczynniki F_j dla obciążenia równoważnej osi standardowej					
	80 kN	100 kN	80 kN	100 kN	80 kN	100 kN
225			5,13278	2,14960	1,27096	0,53227
230			5,57395	2,33436	1,38951	0,58192
235			6,04121	2,53005	1,51567	0,63476
240			6,53565	2,73712	1,64968	0,69088
245			7,05840	2,95604	1,79177	0,75039
250			7,61065	3,18732	1,94220	0,81339
255			8,19367	3,43149	2,10120	0,87998
260			8,80877	3,68909	2,26901	0,95026
265			9,45736	3,96072	2,44587	1,02432
270			10,14087	4,24698	2,63202	1,10228
275			10,86085	4,54850	2,82770	1,18424
280			11,61887	4,86596	3,03318	1,27029
285			12,41660	5,20004	3,24868	1,36054
290			13,25576	5,55148	3,47447	1,45510
295			14,13815	5,92102	3,71081	1,55408
300			15,06563	6,30945	3,95796	1,65758
305			16,04014	6,71757	4,21620	1,76573
310			17,06368	7,14623	4,48580	1,87864
315			18,13832	7,59629	4,76706	1,99644
320			19,26620	8,06864	5,06028	2,11923
325					5,36576	2,24717
330					5,68381	2,38037
335					6,01479	2,51898
340					6,35901	2,66314
345					6,71684	2,81300
350					7,08865	2,96871
355					7,47481	3,13044
360					7,87573	3,29834

6. „WZÓR CZWARTEJ POTĘGI” DO OKREŚLANIA WSPÓŁCZYNNIKA RÓWNOWAŻNOŚCI OBCIĄŻENIA OSI

Na podstawie metody AASHTO powstało wiele różnorodnych modyfikacji wzorów, do określania współczynnika równoważności obciążenia osi, między innymi tak zwany „wzór czwartej potęgi”. W dość dużym, ale akceptowalnym w praktyce uproszczeniu można przyjąć, że współczynniki równoważności obciążenia osi z metody AASHTO mogą być obliczone z tak zwanego „wzoru czwartej potęgi”, o następującej postaci:

$$F_j = (Q_j / Q_s)^4 \quad (9)$$

Bardziej ogólny wzór to:

$$F_j = (Q_j / Q_s)^n \quad (10)$$

gdzie:

- F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi,
- Q_j – obciążenie dowolnej osi,
- Q_s – obciążenie standardowej osi równoważnej 18 000 funtów, czyli 80,1 kN,
- n – wykładnik.

W tabelicy 2 przedstawiono wartości wykładnika „n” wyznaczone przez autora i wsp. [22] dla nawierzchni asfaltowych i betonowych typu ciężkiego według AASHTO, przy $p_t = 2,5$.

Tablica 2. Wartości wykładnika „n” dla nawierzchni asfaltowych i betonowych typu ciężkiego według AASHTO, przy $p_t = 2,5$; wg [22]
Table 2. Values of exponent „n” for asphalt and concrete heavy duty pavements, according to AASHTO, at $p_t = 2,5$; [22]

Wartości wykładnika „n”	Nawierzchnia asfaltowa typu ciężkiego SN = 5	Nawierzchnia betonowa typu ciężkiego grubość płyty 280 mm
Średnia	3,93	4,28
Minimalna	3,78	4,13
Maksymalna	4,14	4,36

Jak widać wykładnik „n” według metody AASHTO, dla przyjętych warunków, jest zbliżony do 4. Różni się on w poszczególnych przedziałach zmienności wartości obciążenia osi Q_j , a zależność ta jest nieregularna. Dotyczy to zarówno nawierzchni asfaltowych jak i betonowych.



7. UPROSZCZONE WZORY NA WSPÓŁCZYNNIKI RÓWNOWAŻNOŚCI OSI POJEDYNCZYCH, PODWÓJNYCH I POTRÓJNYCH

Do opracowania takich wzorów autor wykorzystał wyniki obliczeń według metody AASHTO. Z tablicy 1 wynika po interpolacji, że przy osi standardowej 100 kN, współczynnik równoważności osi przyjmuje wartość równą 1 dla:

- osi pojedynczej dla $Q = 100$ kN,
- osi podwójnej dla $Q = 184,13$ kN,
- dla osi potrójnej dla $Q = 263,36$ kN.

Stąd uproszczone wzory, zgodnie z AASHTO, na współczynniki równoważności osi, dla nawierzchni podatnych KR4 przy osi standardowej 100 kN, są następujące:

- dla osi pojedynczej:

$$F_j = (Q_j / 100)^4, \quad (11)$$

- dla osi podwójnej:

$$F_j = (Q_j / 184)^4, \quad (12)$$

- dla osi potrójnej:

$$F_j = (Q_j / 263)^4. \quad (13)$$

Ściśle biorąc są to wzory dla $SN = 5,15$ (KR4) i $p_t = 2.5$.

Podobnie z metody AASHTO, po wykonaniu obliczeń opartych o dane z tablic podanych przez Huanga [18], dla nawierzchni sztywnych, płyta betonowa 230 mm, $p_t = 2,5$, otrzymano:

- dla osi pojedynczej:

$$F_j = (Q_j / 100)^4, \quad (14)$$

- dla osi podwójnej:

$$F_j = (Q_j / 162)^4, \quad (15)$$

- dla osi potrójnej:

$$F_j = (Q_j / 215)^4. \quad (16)$$

Porównanie wyników obliczeń według tych wzorów z danymi zawartymi w tablicy 1 wykazuje, że te uproszczone wzory są dostatecznie dokładne. Należy dodatkowo zwrócić uwagę na to, że nie można każdej z osi składowych osi wielokrotnej traktować oddzielnie i obliczać dla każdej z nich współczynnika, a potem te współczynniki sumować. Pomiędzy osiami występuje interakcja w przekazywaniu obciążeń. Naprężenia i odkształcenia w nawierzchni od sąsiednich kół sumują się lub odejmują. Dlatego cała oś wielokrotna w obliczeniach nawierzchni musi być traktowana razem. Proszę zwrócić uwagę na liczby występujące w mianowniku wzorów na współczynniki dla osi wielokrotnych. Dla osi podwójnej nie jest to $2 \times 100 = 200$ kN, ale 184 kN – dla nawierzchni podatnej i 162 kN – dla nawierzchni sztywnej. Podobnie jest dla osi potrójnej, nie 3×100 kN = 300 kN, ale odpowiednio 263 i 215 kN.



8. METODA FRANCUSKA

W wytycznych francuskich z 1994 r. [15] podano następujący wzór na współczynnik równoważności obciążenia osi:

$$A = K(P / PO)^\alpha, \quad (17)$$

gdzie:

A – współczynnik agresywności osi, albo według bardziej powszechnej nomenklatury współczynnik równoważności obciążenia osi F_j ,

K – współczynnik uwzględniający typ osi oraz typ nawierzchni,

P – ciężar osi pojedynczej, lub $P = \frac{1}{2}$ ciężaru osi podwójnej lub, $P = \frac{1}{3}$ ciężaru osi potrójnej,

PO – ciężar osi standardowej, $PO = 130$ kN,

α – wykładnik zależny od typu nawierzchni.

Wartości występujące we wzorze (11) podano w tablicy 3.

Tablica 3. Wartości do wzoru francuskiego (11), wg [15]
Table 3. Values for the French formula (11), [15]

Typ nawierzchni	α	K		
		Oś pojedyncza	Oś podwójna	Oś potrójna
Podatna	5	1	0,75	1,1
Półsztywna	12	1	12	113
Betonowa z płyt	12	1	12	113
Betonowa ciąгла zbrojona	12	1	brak danych	brak danych

Należy zwrócić uwagę na to, że dla osi podwójnych i potrójnych przyjmuje się P jako ciężar jednej osi składowej. W żadnym wypadku nie należy wstawiać do wzoru (15) całego ciężaru osi wielokrotnej! W rezultacie ze wzoru francuskiego otrzymuje się dla nawierzchni podatnych podobne współczynniki jak z metody AASHTO.

W tablicy 4 przedstawiono porównanie współczynników według AASHTO (z tablicy 1) i metody francuskiej. W metodzie AASHTO nie ma rozróżnienia na nawierzchnie podatne i półsztywne, a we francuskiej jest. Współczynniki z metody AASHTO przeliczono z osi 80 kN na oś 130 kN ze wzoru 4-tej potęgi. Jak widać z tablicy 4 współczynniki z obu metod są podobne dla nawierzchni podatnych, mimo innej postaci wzorów. Dla nawierzchni półsztywnych różnią się, ale niezbyt radykalnie, jak można by domniemywać porównując wzory z wykładnikiem około 4 w metodzie AASHTO i z wykładnikiem 12 w metodzie francuskiej. Przy mniejszych obciążeniach, gdy osie nie są przeciążone współczynniki francuskie są zdecydowanie mniejsze od AASHTO, a przy większych obciążeniach, gdy osie są przeciążone są większe.



Tablica 4. Porównanie współczynników równoważności obciążenia osi według metody francuskiej i metody AASHTO, oś równoważna 130 kN, wg [23]

Table 4. Comparison of equivalent axle load factors according to the French and AASHTO methods (equivalent axle 130 kN), [23]

Obciążenie osi [kN]	Oś pojedyncza				Oś podwójna				Oś potrójna				
	AASHTO		Francja		AASHTO		Francja		AASHTO		Francja		
	nawierzchnie podatne i pólśzytywne	nawierzchnie podatne	nawierzchnie pólśzytywne	nawierzchnie pólśzytywne	nawierzchnie podatne i pólśzytywne	nawierzchnie podatne	nawierzchnie pólśzytywne	nawierzchnie podatne i pólśzytywne	nawierzchnie podatne i pólśzytywne	nawierzchnie podatne	nawierzchnie pólśzytywne	nawierzchnie podatne	nawierzchnie pólśzytywne
35	4,88E-3	1,41E-3	1,45E-6										
55	0,027	0,014	3,29E-5										
85	0,179	0,120	0,006										
105	0,435	0,344	0,077										
115	0,586	0,542	0,230										
125	0,773	0,822	0,625										
135	1,004	1,208	1,573										
145	1,422	1,726	3,708										
150					0,157	0,048	0,016						
170					0,244	0,090	0,073						
190					0,387	0,156	0,278						
210					0,562	0,258	0,925						
195									0,124	0,034		0,028	
225									0,209	0,070		0,154	
225									0,308	0,131		0,690	
255									0,462	0,229		2,621	

9. WYKŁADNIK „n” WE WZORZE $F_j = (Q_j / Q_s)^n$

„Wzór czwartej potęgi”, jako rezultat Testu AASHO, jest często stosowany w praktyce w całym świecie, ale też jest często krytykowany. Stwierdzono bowiem w wielu późniejszych badaniach, że wykładnik we wzorze nie musi być równy 4. Z badań wynika, że sprawa jest bardzo skomplikowana i wykładnik ten zależy od wielu czynników, takich jak:

- typ nawierzchni (podatna, półsztywna, sztywna),
- grubość warstw,
- typ osi (pojedyncza, podwójna, potrójna),
- obciążenia osi,
- typ zastosowanych opon (pojedyncze, podwójne, szerokie, normalne, radialne, diagonalne),
- ciśnienia w ogumieniu,
- stan wytężenia (zniszczenia) nawierzchni,
- obciążenia dynamiczne i rodzaj zawieszenia.

Dotychczas nie ma definitywnych i jednoznacznych wyników badawczych w tej sprawie. O tym, jak złożona jest ta sprawa świadczy to, że w badaniach OECD/FORCE stwierdzono, że wpływ oddziaływania ciężaru osi na daną nawierzchnię zmienia się w miarę postępu degradacji nawierzchni. Na początku obciążeń, gdy nawierzchnia była w dobrym stanie stwierdzono, że wartość $n=1,8$, a potem w miarę wzrostu liczby spękań nawierzchni n wzrastało do $n=8,8$.

Wśród specjalistów istnieje dość zgodny pogląd co do tego, że wykładnik „n” dla nawierzchni podatnych może być rzędu 4, ale w metodzie francuskiej [15] przyjęto wykładnik równy 5. Nie ma natomiast zgodności co do wartości n dla nawierzchni betonowych i półsztywnych.

Oto ustalenia dotyczące wykładnika „n” dla nawierzchni półsztywnych i betonowych przyjęte w oficjalnych dokumentach w kilku krajach:

Francja

Wartość $n=12$ przyjęto dla podbudów związanych cementem i nawierzchni betonowych [15]

USA

W metodzie AASHTO (1993) [19] przyjmuje się współczynniki doświadczalne. Wykładnik zależy od szeregu czynników, ale zarówno dla nawierzchni betonowych i asfaltowych jest bliski 4. W najnowszej metodzie USA, AASHTO 2002 [13], ale dotychczas będącej przedmiotem prób i analiz, nastąpiło całkowite odejście od koncepcji współczynnika równoważności osi. Ruch, w swej całej złożoności, jest jedną z danych wejściowych do projektowania.

Polska

W katalogu nawierzchni betonowych z 2001 r. przyjęto wykładnik $n=8$ [24]. Podano w opisie, że „n” dla nawierzchni betonowych zmienia się od 5 do 14.



Niemcy

W katalogu z 2001 r. (RStO 01) do obliczenia ruchu zarówno dla nawierzchni asfaltowych jak i betonowych przyjęto prawo czwartej potęgi, $n = 4$ [12].

Austria

Przyjęto w przepisach RVS 3.63 także prawo czwartej potęgi, $n = 4$ [25].

Sprawa jak widać nie jest jednoznaczna. Nie można negować wyników badań w Teście AASHO, które dla nawierzchni betonowych dały wykładnik $n = 4$. Nikt potem w świecie nie wykonał tak wielkich badań w pełnej skali. Z drugiej jednak strony, ze wzorów trwałości zmęczeniowej wynika dość jednoznacznie, że spękania zmęczeniowe są powiązane z obciążeniem ruchem prawem zmęczeniowym o wysokiej potędze, rzędu $8 \div 12$. Spękania zmęczeniowe nie są jednak jedyną i decydującą formą uszkodzeń nawierzchni betonowych. Ponadto, wyniki testów laboratoryjnych, z natury modelowych i krótkotrwałych, nie muszą w pełni odpowiadać zachowaniu się materiału w rzeczywistych warunkach w nawierzchni. W Teście AASHO uwzględniono różnorodne formy powstających uszkodzeń nawierzchni betonowej, a nie tylko spękania zmęczeniowe. Inne formy uszkodzeń nawierzchni, takie jak spękania termiczne, klawiszowanie płyt, uszkodzenia szczelin, i tp. powstają według innych praw niż prawa zmęczeniowe, ale prawa rządzące tymi typami uszkodzeń nie są dotąd znane. W Teście AASHO nie badano nawierzchni półsztywnych.

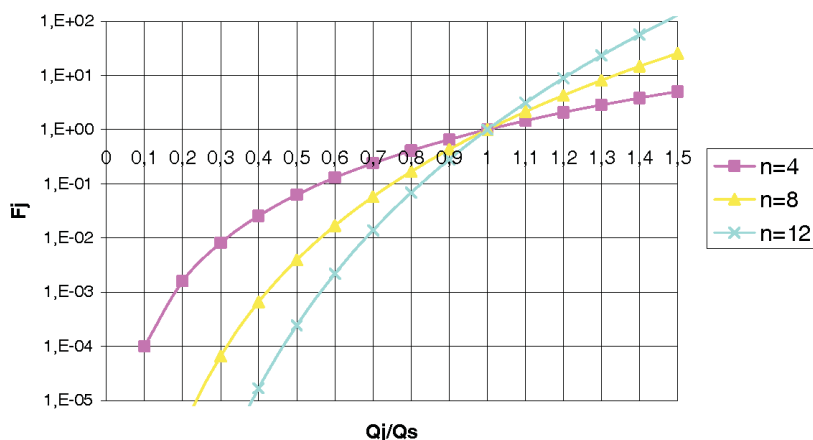
Jakkolwiek nie ma dotąd definitywnych wyników badań, to obecnie jest pogląd wśród części specjalistów, że dla nawierzchni podatnych $n = 4$, dla podbudów związanych spoiwami hydraulicznymi i dla płyt betonowych wykładnik n jest rzędu $8 \div 12$. Huhtala podaje dla nawierzchni betonowych $n = 15 \div 20$ [26].

Wpływ wartości wykładnika „n” na współczynnik równoważności osi

Jak wielki to wpływ widać na prostym przykładzie. Jeżeli ciężar osi zmieni się (wzrośnie lub zmaleje) 2- krotnie to przy $n = 4, 8$ i 12 agresywność oddziaływania osi na nawierzchnie zmieni się (wzrośnie lub zmaleje) odpowiednio 16, 256 i 4096 razy!!!

Rysunek 3 przedstawia jak współczynnik równoważności F_j zmienia się w zależności od wartości wykładnika „n”. Przy Q_j / Q_s mniejszym od 1 (dla osi rzeczywistych Q_j lżejszych od osi standardowej Q_s) współczynnik F_j dla rosnącego „n” jest mniejszy. Jeżeli Q_j / Q_s jest większe od 1 (dla osi rzeczywistych Q_j cięższych od standardowej Q_s) to współczynnik F_j przy rosnącym n wyraźnie wzrasta. Oznacza to, że jeżeli przy projektowaniu przyjęte obciążenie osi standardowej Q_s jest bliskie lub większe od maksymalnego obciążenia rzeczywistego to obliczony ruch zastępczy przy większym „n” będzie mniejszy, a przy mniejszym „n” będzie większy. Jeżeli natomiast przyjęte obciążenie standardowe będzie istotnie mniejsze od maksymalnych rzeczywistych obciążeń to będzie odwrotnie.





Rys.3. Współczynnik równoważności w zależności od wykładnika „n”
Fig.3. Equivalency factor in relation to exponent „n”

Wykładnik „n” i wpływ osi przeciążonych

Przy dużej wartości „n” szczególnie wyraźnego znaczenia nabiera udział osi przeciążonych, o ciężarze istotnie większym od obciążenia standardowego, czyli gdy $Q_j \gg Q_s$. Ilustruje to poniższy przykład.

Przykład

Przyjęto rozkład ruchu jak w tabelicy 5, z różnymi procentami osi przeciążonych, powyżej 100 kN, od 0 do 10%.

Tabela 5. Przyjęte rozkłady ruchu z różnymi % osi przeciążonych ponad 100 kN
Table 5. Assumed traffic load distributions with different percentages of overloaded axles above 100 kN

Grupa obciążenia osi [kN]	Średnie obciążenie osi w grupie [kN]	% osi w grupie							
		24	24	24	24	24	24	24	24
0 – 20	10	24	24	24	24	24	24	24	24
21 – 40	30	25	25	25	25	25	25	25	25
41 – 60	50	20	20	20	20	20	20	20	20
61 – 80	70	13	14	16	18	18	18,5	19	
81 – 100	90	8	9	8	8	9	10,5	12	
101 – 120	110	5	4,5	4	3,5	3	1,5	0	
121 – 140	130	3	2	2	1	0,8	0,5	0	
140 – 160	150	2	1,5	1	0,5	0,2	0	0	
suma		100	100	100	100	100	100	100	
% osi przeciążonych > 100 kN		10	8	7	5	4	2	0	



Założono, że w każdym przypadku całkowita liczba osi w ciągu jednej doby jest taka sama i wynosi:

$$\text{SRD} = 10\,000 \text{ osi rzeczywistych.}$$

Wykonano obliczenia dla następujących kombinacji danych:

- wykładnik $n = 4, n = 8, n = 12,$
- oś standardowa $Q_s = 100 \text{ kN}$ i $Q_s = 115 \text{ kN}.$

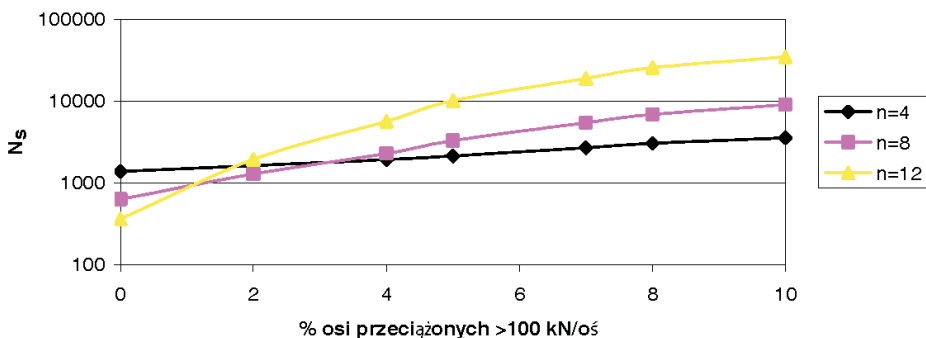
Wyniki przedstawia tablica 6 oraz rysunki 4 i 5.

Tablica 6. Wyniki obliczeń dobowego ruchu zastępczego wyrażonego w osiach standardowych $Q_s = 115 \text{ kN}$ i $Q_s = 100 \text{ kN}$

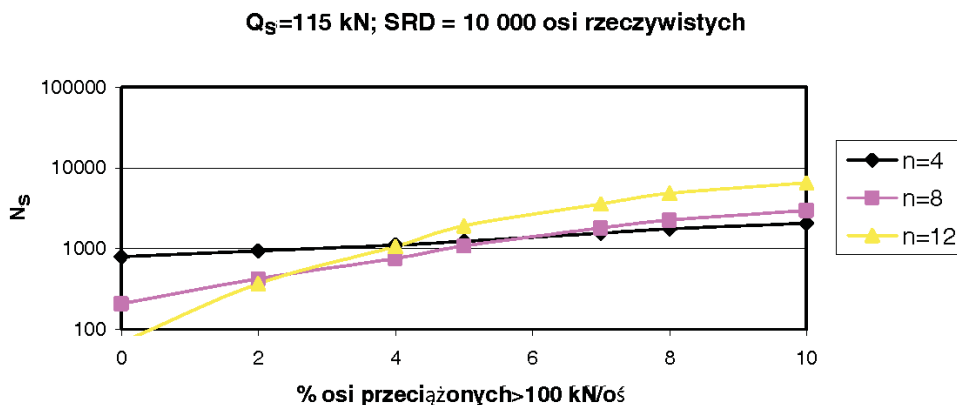
Table 6. Results of calculation of equivalent daily traffic expressed in standard axle loads of $Q_s = 115 \text{ kN}$ and $Q_s = 100 \text{ kN}$

Przeciążenie osi >100 kN [%]	Oś standardowa $Q_s = 115 \text{ kN}$			Oś standardowa $Q_s = 100 \text{ kN}$		
	$n = 4$	$n = 6$	$n = 12$	$n = 4$	$n = 8$	$n = 12$
0	794	207	68	1 389	634	366
2	938	424	366	1 641	1 296	1 958
4	1 108	754	1 062	1 937	2 307	5 680
5	1 231	1 080	1 900	2 154	3 304	10 167
7	1 554	1 797	3 577	2 718	5 496	19 138
8	1 750	2 261	4 824	3 062	6 917	25 808
10	2 049	2 966	6 495	3 584	9 072	34 752

$Q_s = 100 \text{ kN}; \text{SRD} = 10\,000 \text{ osi rzeczywistych}$



Rys.4. Dobowy ruch zastępczy w osiach standardowych $Q_s = 100 \text{ kN}$, przy różnych przeciążeniach osi powyżej 100 kN, przy ruchu dobowym 10 000 osi rzeczywistych
Fig.4. Equivalent daily traffic expressed in standard axle loads of $Q_s = 100 \text{ kN}$, for different overloadings above 100 kN, for daily traffic of 10 000 real axles



Rys.5. Dobowy ruch zastępczy w osiach standardowych $Q_s = 115$ kN, przy różnych przeciążeniach osi powyżej 100 kN, przy ruchu dobowym 10 000 osi rzeczywistych

Fig.5. Equivalent daily traffic expressed in standard axle loads of $Q_s = 115$ kN, for different overloadings above 100 kN, for daily traffic of 10 000 real axles

Wnioski z obliczeń

- Osie przeciążone mają bardzo duży wpływ destrukcyjny na nawierzchnie.
- Wzrost wykładnika „n” wypukła bardzo istotnie destrukcyjny wpływ osi przeciążonych.
- Odpowiednie uwzględnienie wpływu przeciążenia osi w projektowaniu nawierzchni zależy od tego jakie obciążenie przyjmujemy dla osi standardowej (np.: 100 czy 115 kN).
- Przy projektowaniu nawierzchni półsztywnych i sztywnych lepiej jest, gdy przyjęte obciążenie osi standardowej jest równe maksymalnemu dopuszczalnemu obciążeniu osi. Przy wysokim obciążeniu osi przyjętym do obliczeń mniejsze będą błędy związane z przyjęciem wartości wykładnika „n”. W rzeczywistości nigdy nie jesteśmy pewni wielkości tego wykładnika.
- Przy projektowaniu nawierzchni podatnych jest to też wskazane, ale ma to mniejsze znaczenie.

10. PODSTAWY METOD ANALITYCZNYCH OKREŚLANIA WSPÓŁCZYNNIKA RÓWNOWAŻNOŚCI OBCIĄŻENIA OSI

W metodach analitycznych wykorzystuje się wprost definicję współczynnika równoważności obciążenia osi. Definicję współczynnika równoważności obciążenia osi przyjętą w USA podali między innymi Yoder i Witczak [9] oraz Huang [18]. Współczynnik równoważności obciążenia osi F_j jest to stosunek niszczonego oddziaływania jaki na określonej nawierzchni wywiera przejście rozpatrywanej osi rzeczywistej, do niszczonego wpływu jaki na tę samą nawierzchnię wywiera przejście wybranej standardowej osi równoważnej.

Niszczący wpływ na nawierzchnię pojedynczego przejścia osi pojazdu określany jest jako jednostkowe uszkodzenie nawierzchni albo inaczej jednostkowa szkoda zmęczeniowa.

Można przyjąć, że dla każdej konstrukcji nawierzchni istnieje taka ilość obciążeń określonej osi, która spowoduje zniszczenie tej nawierzchni. Oznaczmy ją przez:

N_{fs} – całkowita liczba obciążeń osi standardowych jaką może przenieść nawierzchnia do zniszczenia,

N_{jf} – całkowita liczba obciążeń osi rzeczywistej j -tej, jaką może przenieść nawierzchnia do zniszczenia.

Jednostkowa szkoda zmęczeniowa nawierzchni może być obliczona jako odwrotność liczby obciążeń osi potrzebnej do zniszczenia nawierzchni. W przypadku osi standardowej jednostkowa szkoda zmęczeniowa nawierzchni wynosi:

$$d_s = 1 / N_{fs} . \quad (18)$$

W przypadku osi rzeczywistej jednostkowa szkoda zmęczeniowa nawierzchni wynosi:

$$d_j = 1 / N_{jf} . \quad (19)$$

Z definicji współczynnik równoważności obciążenia osi F_j będzie równy:

$$F_j = d_j / d_s . \quad (20)$$

Po podstawieniu za d_s i d_j wartości ze wzorów (18) i (19) otrzymamy następujące wyrażenie na F_j :

$$F_j = d_j / d_s = (1 / N_{jf}) / (1 / N_{fs}) . \quad (21)$$

Stąd otrzymuje się inną postać wzoru na współczynnik równoważności obciążenia osi:

$$F_j = N_{fs} / N_{jf} . \quad (22)$$

Wzór ten można interpretować w następujący sposób: współczynnik równoważności obciążenia osi F_j jest to stosunek całkowitej ilości obciążeń osi standardowych jakie może przenieść nawierzchnia do jej zniszczenia do ilości osi rzeczywistych j -tych, jakie może przenieść ta sama nawierzchnia do jej zniszczenia.

Jak widać w metodach analitycznych wyznaczanie współczynników równoważności osi oparte jest o wyznaczenie całkowitej ilości obciążeń osi, jakie może przenieść nawierzchnia do jej zniszczenia, czyli o trwałość zmęczeniową N_{jf} .

11. REGUŁA MINERA

Z koncepcją trwałości zmęczeniowej nawierzchni związana jest bardzo ściśle reguła Minera o sumowaniu szkód zmęczeniowych. Reguła ta mówi, że szkody zmęczeniowe sumują się liniowo i materiał ulegnie zniszczeniu, gdy suma szkód zmęczeniowych przekroczy wartość 1:

$$\sum D_j > 1, \quad (23)$$

$$D_j = N_j / N_{f,j}, \quad (24)$$

gdzie:

D_j – szkoda zmęczeniowa od obciążenia osiami typu k o obciążeniu j ,

N_j – oczekiwana ilość obciążeń osiami o obciążeniu j ,

$N_{f,j}$ – ilość obciążeń osiami j potrzebna do zniszczenia nawierzchni,

j – różne obciążenia osi.

Zasada ta byłoby spełniona wtedy, gdyby nawierzchnia zachowywała „pamięć” o wszystkich obciążeniach, jakich doznała od chwili jej wybudowania do zniszczenia. Można rozsądnie założyć, że tak nie jest. Doświadczenie wskazuje, że reguła Minera nie zawsze jest spełniona nawet przy badaniach zmęczeniowych na specjalnie przygotowywanych próbkach w laboratoriach, przeprowadzanych w modelowych warunkach, w bardzo krótkim czasie. Trudno oczekiwać, aby reguła sumowania szkód zmęczeniowych Minera była spełniona w realnych warunkach na drodze, gdzie pomiędzy obciążeniami występują różne przerwy czasowe i zmienia się temperatura, występuje zamrażanie i rozmrażanie, nasłonecznienie lub jego brak, zmiany wilgotności, a obciążenia małe przeplatają się z dużymi i tp. Stwierdzono i udokumentowano występowanie zjawiska „healingu”, czyli regeneracji nawierzchni asfaltowych w okresie wypoczynku, zwłaszcza w wyższych temperaturach, po którym to okresie trwałość zmęczeniowa ponownie istotnie wzrasta [27].

Bardzo przekonujące w tym względzie są badania brytyjskie. W badaniach tych (Nunn i wsp. [28]) pobrano próbki z nawierzchni asfaltowych na czterech autostradach, z dwóch miejsc, z linii śladów kół na najbardziej obciążonym (1) lewym pasie (pamiętajmy o ruchu lewostronnym) i ze środka pomiędzy śladami kół na (3) prawym, najmniej obciążonym pasie. Wykonano badania zmęczeniowe w laboratorium TRL. Dodatkowo pobrano próbki ze spodu i z góry warstwy podbudowy. Gdyby ruch miał destrukcyjny wpływ i obowiązywałoby w pełni reguła sumowania się szkód zmęczeniowych Minera, to stwierdzonoby mniejszą trwałość próbek pobranych z bardziej obciążonego (1) pasa i większą z mało obciążonego (3) pasa. Podobnie próbki ze spodu warstwy podbudowy asfaltowej, gdzie występuje rozciąganie powinny być znacznie słabsze niż próbki z góry warstwy podbudowy, gdzie występuje ściskanie. Tak jednak nie było. Wszystkie pobrane próbki, zarówno z miejsc obciążonych bardzo intensywnym ruchem autostradowym, jak z miejsc nie obciążonych miały statystycznie biorąc podobną trwałość zmęczeniową. To samo stwierdzono w przypadku próbek pobranych z góry i z dołu warstw asfaltowych. Wyniki brytyjskie przedstawia tablica 7. W tablicy 7 przyjęto względną miarę trwałości zmęczeniowej: 1 – dla pasa pierwszego najbardziej obciążonego, a wartość dla pasa trzeciego (najmniej obciążonego) obliczono jako wartość względną względem pasa pierwszego. Stwierdzono w konkluzji, że poziom ruchu nie był czynnikiem determinującym pozostałą trwałość zmęczeniową podbudowy asfaltowej. Badania te skłaniają do ograniczenia ważności reguły Minera w przypadku nawierzchni asfaltowych. Reguła ta jest dalej stosowana



w mechanice nawierzchni, ze względu na brak jakiegokolwiek innego dokładniejszego wzoru, ale po badaniach brytyjskich można mieć wątpliwości, co do jej znaczenia.

Tablica 7. Wyniki badań pozostałej trwałości zmęczeniowej próbek pobranych z podbudów asfaltowych z autostrad brytyjskich [28]

Table 7. Results of testing of residual fatigue life of specimens taken from asphalt base courses from British motorways [28]

Autostrada	Wiek (lat)	Skumulowane obciążenie ruchem (mln osi 80 kN)	Grubość warstw asfaltowych (mm)	Pas ruchu	Liczba testów zmęczeniowych (badanych próbek)	Względna trwałość zmęczeniowa
M4	11	22	230	1	80	1,0
				3	76	1,5
M5	19	66	300	1	35	1,0
				3	33	0,7
M1	23	71	350	1	19	1,0
				3	11	1,6
M62	21	57	300	1	28	1,0
				3	31	0,4
średnio				1	162	1,00
				3	151	1,05

Legenda:
pas ruchu 1 – najbardziej obciążony, pas ruchu 3 – najmniej obciążony.

Fakt, że reguła Minera nie zawsze jest w pełni spełniona w przypadku nawierzchni drogowych wpływa istotnie na niedokładności w wyznaczaniu współczynników równoważności osi i trwałości zmęczeniowej.

12. WSPÓŁCZYNNIKI RÓWNOWAŻNOŚCI OBCIĄŻENIA OSI ZE WZGLĘDU NA RÓŻNORODNE FORMY ZNISZCZENIA NAWIERZCHNI

W tym miejscu należy sprecyzować pojęcie „zniszczenia nawierzchni” przyjęte w podanej wyżej definicji współczynnika równoważności obciążenia osi. W odróżnieniu do wielu innych konstrukcji inżynierskich pojęcie zniszczenia nawierzchni nie jest jednoznaczne. Nawierzchnia nie ulega nagle zniszczeniu, które uniemożliwia jej dalszą eksploatację, tak jak może ulec zniszczeniu na przykład most czy budynek. Nawierzchnia ulega natomiast ciągłej i stopniowej degradacji, która utrudnia jej eksploatację, powoduje dyskomfort użytkowników, zwiększa koszty użytkowania i wydłuża czas transportu. W metodach mechanistycznych przyjmuje się następujące formy zniszczenia nawierzchni:



- a) spękania zmęczeniowe warstw asfaltowych,
- b) deformacje (koleiny) strukturalne nawierzchni asfaltowych,
- c) spękania zmęczeniowe podbudów związanych cementem w nawierzchniach pólstywnych,
- d) spękania płyt betonowych nawierzchni sztywnych,
- e) koleiny lepko-plastyczne nawierzchni asfaltowych.

Metody mechanistyczne pozwalają na analizę obliczeniową czterech pierwszych form zniszczenia nawierzchni. Piąta forma, koleiny lepko-plastyczne, ze względu na bardzo złożony charakter zjawiska nie została dotąd wystarczająco dobrze scharakteryzowana w postaci opisu analitycznego i nie jest przedmiotem analiz obliczeniowych w projektowaniu nawierzchni. Trzeba stwierdzić, że próby analizy kolein lepko-plastycznych były (np.: metoda Shella [29]), ale okazały się niewystarczająco dokładne.

Każdą z form zniszczenia nawierzchni rządzi inne prawo zmęczeniowe. W wyniku obliczeń według metod mechanistycznych dla identycznych danych wyjściowych (warunków gruntowo-wodnych, typu nawierzchni, rodzaju i grubości warstw, klimatu i warunków obciążenia) otrzymamy inne ilości obciążeń osi do wystąpienia krytycznej wartości określonej formy zniszczenia nawierzchni.

Otrzymamy zbiór następujących wielkości trwałości zmęczeniowych:

- N_{f1} – trwałość zmęczeniowa ze względu na spękania warstw asfaltowych,
- N_{f2} – trwałość zmęczeniowa ze względu na deformacje strukturalne,
- N_{f3} – trwałość zmęczeniowa podbudów związanych cementem,
- N_{f4} – trwałość zmęczeniowa nawierzchni betonowej.

Procesy powstawania różnych form uszkodzeń odbywają się z różną prędkością. Ze względu na różną wrażliwość poszczególnych elementów strukturalnych nawierzchni na oddziaływanie obciążeń trwałości zmęczeniowe N_{f1} , N_{f2} , N_{f3} są z reguły od siebie różne. W związku z tym, po uwzględnieniu definicji współczynnika równoważności obciążenia osi:

$$F_j = N_{fs} / N_{ff} \quad (25)$$

otrzymamy cztery różne wartości współczynnika równoważności obciążenia osi, to znaczy:

- a) współczynnik równoważności osi ze względu na spękania warstw asfaltowych:

$$F_{j1} = N_{fs1} / N_{ff1} \quad , \quad (26)$$

- b) współczynnik równoważności obciążenia osi ze względu na deformacje strukturalne nawierzchni asfaltowych:

$$F_{j2} = N_{fs2} / N_{ff2} \quad , \quad (27)$$



- c) współczynnik równoważności obciążenia osi ze względu na spękania podbudów związanych cementem:

$$F_{j3} = N_{fs3} / N_{ff3} \quad , \quad (28)$$

- d) współczynnik równoważności obciążenia osi ze względu na spękania płyt betonowych:

$$F_{j4} = N_{fs4} / N_{ff4} \quad . \quad (29)$$

W powyższych wzorach wartości z indeksem „s” dotyczące osi standardowych, a z indeksem „j” osi rzeczywistych. Wartości występujące w powyższych wzorach mogą być obliczone przy wykorzystaniu metod mechanistycznych.

Metody empiryczne, albo uproszczone analizy oparte o teorię lepkosprężystości umożliwiają wyznaczenie piątej wielkości charakterystycznej, którą jest:

- e) współczynnik równoważności obciążenia osi ze względu na koleiny lepkoplastyczne w warstwach asfaltowych:

$$F_{j5} = N_{fs5} / N_{ff5} \quad . \quad (30)$$

Wartości pięciu powyżej sformułowanych współczynników są z reguły od siebie różne

$$F_{j1} \neq F_{j2} \neq F_{j3} \neq F_{j4} \neq F_{j5} \quad . \quad (31)$$

U wielu drogowców wystąpienie kilku współczynników równoważności osi może budzić zdziwienie. Dotychczas operowano w Polsce jednym takim współczynnikiem. Również w metodzie AASHTO występuje jeden współczynnik równoważności obciążenia osi „*Equivalent Axle Load Factor*” dla nawierzchni podatnych i drugi dla nawierzchni sztywnych. Jednak w metodzie AASHTO „stan zniszczenia” nawierzchni definiowany jest inaczej niż w metodach mechanistycznych. W metodzie AASHTO przyjęto jedną miarę osiągnięcia stanu utraty przydatności nawierzchni do dalszej eksploatacji („*loss of serviceability*”). Miarą tą jest terminalna krytyczna wartość współczynnika przydatności eksploatacyjnej nawierzchni PSI („*Present Serviceability Index*”), równa 2 dla nawierzchni dróg drugorzędnych i 2,5 dla nawierzchni dróg głównych. Wartość PSI zależy od liczby spękań nawierzchni, kolein, nierówności podłużnych, łat i innych uszkodzeń powierzchniowych. Po przyjęciu jednej miary stanu terminalnego, w metodzie AASHTO otrzymano tylko jeden współczynnik równoważności obciążenia osi. Jeżeli miara zniszczenia jest jedna to konsekwentnie musi być jedna wartość współczynnika równoważności obciążenia osi. Jeżeli jednak chcemy określić oddziaływanie ruchu na różne formy uszkodzeń nawierzchni to wystąpią różne współczynniki równoważności osi.

Są dwie możliwości wyznaczania współczynników według metod mechanistycznych:

- wprost ze wzorów zmęzeniowych (metoda uproszczona),
- z analizy konkretnych konstrukcji nawierzchni (metoda dokładniejsza).

Ze względu na ograniczoną objętość tej pracy poniżej przedstawiony zostanie przykład zastosowanie tylko pierwszej z tych metod.

13. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW RÓWNOWAŻNOŚCI OBCIĄŻENIA OSI WPROST ZE WZORÓW ZMĘCZENIOWYCH

Wzory zmęczeniowe dotyczące nawierzchni podatnych i półsztywnych omówiono szczegółowo w pracy autora [30]. Wzory te zastosowano do wyznaczania współczynników równoważności obciążenia osi, co przedstawiono poniżej.

Kryterium spękań warstw asfaltowych

Dla spękań warstw asfaltowych stosowane jest często kryterium Instytut Asfaltowego. Według tego kryterium trwałość zmęczeniowa warstwy asfaltowej jest równa:

$$N_{f, asf} = 18,4 \cdot C \cdot (6,167 \cdot 10^{-5} \cdot \epsilon_a^{-3,291} \cdot E^{+0,854}) , \quad (32)$$

gdzie:

$N_{f, asf}$ – trwałość zmęczeniowa warstwy asfaltowej, do wystąpienia spękań na 20% powierzchni,

$$C = 10^M , \quad (33)$$

$$M = 4,84 \cdot [(V_{asf} / (V_{asf} + V_V)) - 0,69] , \quad (34)$$

V_{asf} – objętościowa zawartość asfaltu [%],

V_V – zawartość wolnych przestrzeni [%],

E – moduł sztywności warstwy asfaltowej,

ϵ_a – odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych.

Dla danej nawierzchni, w określonych warunkach, wartości C , V_{asf} , V_V i E są stałe, a ϵ_a zależy od obciążenia nawierzchni. Po podstawieniu $N_{f, asf}$ do wzoru na współczynnik $F_j = N_{fs} / N_{ff}$ otrzymamy:

$$F_j = (\epsilon_{as}^{-3,291}) / (\epsilon_{aj}^{-3,291}) = (\epsilon_{as} / \epsilon_{aj})^{-3,291} = (\epsilon_{aj} / \epsilon_{as})^{3,291} , \quad (35)$$

gdzie:

ϵ_{aj} – odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych wywołane przez rozpatrywaną oś rzeczywistą,

ϵ_{as} – odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych wywołane przez oś standardową.

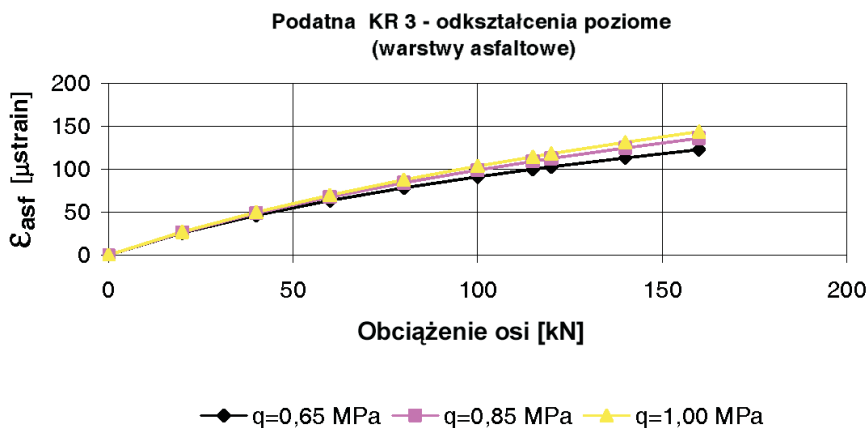


Odształcenie ε jest proporcjonalne do obciążenia osi Q . Jeżeli przyjąć, że związek ten jest liniowy $\varepsilon = \alpha_a \cdot Q$, gdzie α_a – wartość stała dla danej nawierzchni, to:

$$F_j = (\varepsilon_{aj} / \varepsilon_{as})^{3,291} = (Q_j / Q_s)^{3,291} . \quad (36)$$

Otrzymaliśmy w rezultacie zależność, w formie podobnej do wzoru czwartej potęgi z wykładnikiem 3,291.

Powyżej przyjęto założenie o liniowości związku pomiędzy odształceniami i obciążeniem osi $\varepsilon = \alpha_a \cdot Q$. Wykonano obliczenia sprawdzające dla nawierzchni podatnej z polskiego katalogu, typu KR3. Wyniki obliczeń podano na rys. 6 i w tabelicy 8. Wynika z nich, że związek pomiędzy odształceniem rozciągającym na spodzie warstw asfaltowych a obciążeniem osi, dla nawierzchni podatnej KR3, nie jest liniowy, co zmniejsza wiarygodność wzoru (36). Biorąc pod uwagę wykładnik 3,291 we wzorze (30) można stwierdzić, że występujące odchylenia od liniowości mogą mieć istotny wpływ na wyniki. W tym przypadku wykorzystanie uproszczonych zależności nie jest więc zalecane. W celu wyznaczenia współczynników równoważności konieczne są obliczenia mechaniczne konkretnych konstrukcji nawierzchni.



Rys.6. Związek pomiędzy poziomym odształceniem rozciągającym na spodzie warstw asfaltowych a obciążeniem osi, dla nawierzchni podatnej KR3 (podbudowa z kruszywa stabilizowanego mechanicznie), przy różnych ciśnieniach kontaktowych q

Fig.6. Relationship between horizontal tensile strain at the bottom of asphalt layers and axle load, for the flexible pavement KR3 (base course of crushed aggregate), at different contact pressures q

Tablica 8. Związki analityczne pomiędzy odkształceniem, naprężeniem i obciążeniem osi (od 20 do 160 kN) dla konstrukcji podatnej KR3 i półsztywnej KR3
 Table 8. Analytical relations between strain, stress and axle load (from 20 to 160 kN) for the flexible and semi-rigid pavement structures KR3

Ciśnienie w ogumieniu [kPa]	Nawierzchnia podatna KR3 – podbudowa z kruszywa			Nawierzchni półsztywna KR3 – podbudowa stabilizowana cementem	
	Odkształcenia na spodzie warstw asfaltowych ϵ_a	R^2	Odkształcenia na górnej powierzchni podłoża gruntowego ϵ_p	R^2	Naprężenia na spodzie warstwy podbudowy związanej cementem σ
650	$y=0,8547x$ $y=1,2105x-0,0028x^2$	0,9492 0,9981	$y=-2,9119x$ $y=-3,1794x+0,0021x^2$	0,9970 1,0000	$y=0,0050x$ $y=0,0058-6E-06x^2$
850	$y=0,9343x$ $y=1,2745x-0,0027x^2$	0,9628 0,9990	$y=-2,9743x$ $y=-3,1911x-0,017x^2$	0,9982 1,0000	$y=0,0052$ $y=0,0058x-6E-06x^2$
1000	$y=0,9812x$ $y=1,3079x-0,0026x^2$	0,9696 0,9993	$y=-3,0061x$ $y=-3,1958x-0,0015x^2$	0,9986 1,0000	$y=0,0053$ $y=0,0059x-5E-06x^2$

Legenda:

y – odkształcenia [mikrostrain = 10^{-6}] albo naprężenie [MPa],

x – obciążenie osi [MPa]

Kryterium deformacji strukturalnych (odkształceń podłoża)

Zależność stosowana w większości metod projektowych ma następującą postać.

$$\varepsilon_p = k(1 / N_{f,p})^m, \quad (37)$$

gdzie:

ε_p – pionowe odkształcenia ściskające wywołane na górnej powierzchni podłoża gruntowego przez obciążenie osią,

$N_{f,p}$ – liczba dopuszczalnych obciążeń do osiągnięcia krytycznej głębokości koleiny,

k, m – współczynniki empiryczne.

Stąd:

$$N_{f,p} = (k / \varepsilon_p)^{1/m}. \quad (38)$$

Według kryterium Instytutu Asfaltowego współczynniki w równaniu zmęczeniowym (32) są równe: $k = 1,05$; $m = 0,223$. Po podstawieniu $N_{f,p}$ do wzoru na współczynnik $F_j = N_{fs} / N_{ff}$ otrzymam:

$$F_j = (\varepsilon_{pj} / \varepsilon_{ps})^{1/m} = (\varepsilon_{pj} / \varepsilon_{ps})^{4,484}, \quad (39)$$

gdzie:

$\varepsilon_{pj}, \varepsilon_{ps}$ – pionowe odkształcenia ściskające wywołane na górnej powierzchni podłoża gruntowego odpowiednio przez obciążenie osią rzeczywistą Q_j i standardową Q_s .

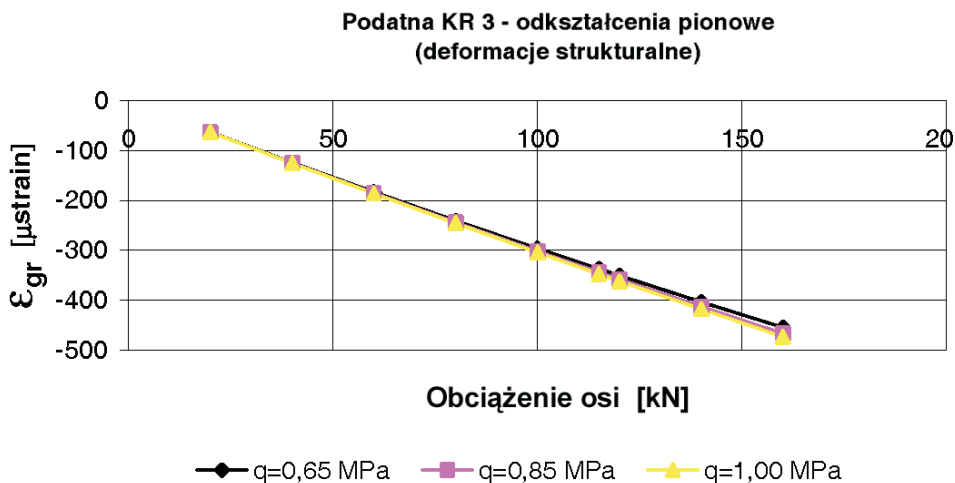
Jeżeli przyjąć, że obowiązuje liniowy związek $\varepsilon_p = \alpha_p \cdot Q$, gdzie α_p – wartość stała dla danej nawierzchni, to:

$$F_j = (\varepsilon_{pj} / \varepsilon_{ps})^{4,484} = (Q_j / Q_s)^{4,484}. \quad (40)$$

Otrzymaliśmy w rezultacie zależność, w formie podobnej do „wzoru czwartej potęgi” z wykładnikiem 4,484.

Powyżej przyjęto założenie o liniowości związku pomiędzy odkształceniami i obciążeniem osi $\varepsilon_p = \alpha_p \cdot Q$. Wykonano obliczenia sprawdzające dla nawierzchni podatnej z polskiego katalogu, typu KR3. Wyniki obliczeń przedstawiona na rys. 7 i w tabelicy 8. Wynika z nich, że związek pomiędzy odkształceniem pionowym na górze podłoża gruntowego ε_p , a obciążeniem osi Q jest w przybliżeniu liniowy, co potwierdza w tym względzie wiarygodność wzoru (40).





Rys. 7. Związek pomiędzy pionowym odkształceniem ściskającym na górnej powierzchni podłoża gruntowego pod nawierzchnią a obciążeniem osi, dla nawierzchni podatnej KR3 (podbudowa z kruszywa stabilizowanego mechanicznie), przy różnych ciśnieniach kontaktowych q

Fig. 7. Relationship between compressive vertical strain at the top of subgrade soil and axle load, for the flexible pavement KR3 (base course of crushed aggregate), at different contact pressures q

Kryterium spękań podbudowy związanej cementem

W niniejszej pracy zastosowano kryterium opracowane w Uniwersytecie w Illinois (USA). Do projektowania podbudów związanych cementem przyjęto tam zależności zmęczeniowe zalecane w metodzie Portland Cement Association (PCA) projektowania nawierzchni betonowych. Kryterium zmęczeniowe jest następujące:

$$\log N_{f, \text{cem}} = 11,784 - 12,121 (\sigma / R_b) , \quad (41)$$

gdzie:

$N_{f, \text{cem}}$ – liczba obciążeń do spękań podbudowy związanej cementem,

(σ / R_b) – wskaźnik naprężeniowy,

σ – maksymalne naprężenia rozciągające w podbudowie wywołane przez ruch,

R_b – wytrzymałość na zginanie materiału podbudowy.

Po podstawieniu $\log N_f$ do wzoru na współczynnik $F_j = N_{fs} / N_{ff}$ otrzymamy:

$$\log(F_j) = \log(N_{fs}) - \log(N_{ff}) , \quad (42)$$

$$\log(F_j) = \log(N_{f, \text{cem}, s}) - \log(N_{f, \text{cem}, j}) , \quad (43)$$



$$\log(F_j) = 12,121 [(\sigma_j / R_b) - (\sigma_s / R_b)] , \quad (44)$$

$$\log(F_j) = 12,121 [(\sigma_j - \sigma_s) / R_b] . \quad (45)$$

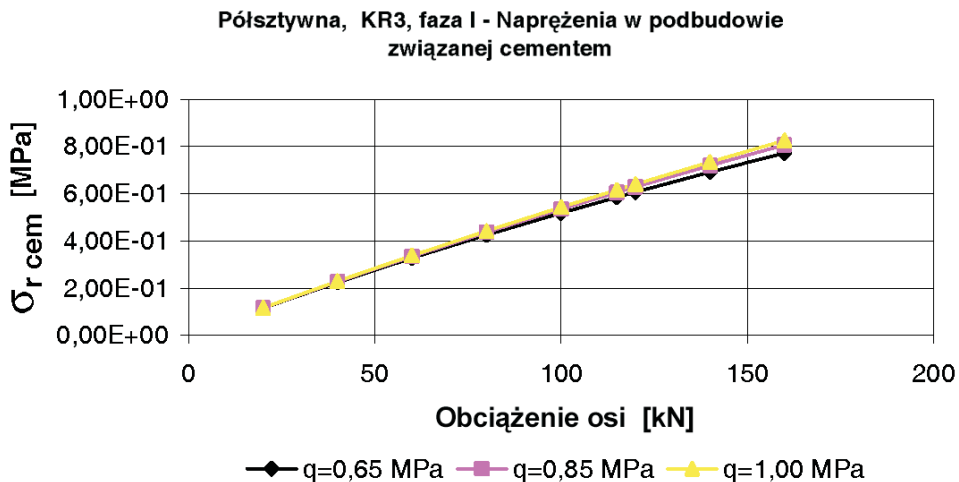
Jeżeli przyjąć, że obowiązuje liniowy związek $\sigma = \alpha_{cem} \cdot Q$, gdzie α_{cem} – wartość stała dla danej nawierzchni, to:

$$\log(F_j) = 12,121 [\alpha_{cem} (Q_j - Q_s) / R_b] . \quad (46)$$

W tym przypadku zależności są bardziej złożone. Aby określić F_j konieczna jest znajomość współczynnika α_{cem} i wytrzymałości podbudowy na zginanie R_b . Do obliczeń konieczne są parametry warstw i analiza naprężeń w konstrukcji nawierzchni.

Wyprowadzona zależność (40) jest też przydatna nie tylko dla podbudów związanych cementem, ale także dla płyt betonowych, ponieważ jest ona wyprowadzona z zależności zmęczeniowa dla betonu według Portland Cement Association.

Powyżej przyjęto założenie o liniowości związku pomiędzy naprężeniami rozciągającymi w podbudowie związanej cementem i obciążeniem osi $\sigma = \alpha_{cem} \cdot Q$. Wykonano obliczenia sprawdzające dla nawierzchni półsztywnej z polskiego katalogu, typu KR3 – podbudowa z kruszywa stabilizowanego cementem (rys. 8 i tablica 8). Z rys. 10 i z tablicy 8 wynika, że związek pomiędzy naprężeniem rozciągającym na spodzie warstwy stabilizowanej cementem a obciążeniem osi, dla nawierzchni podatnej KR3, jest w przybliżeniu liniowy, co potwierdza w tym względzie wiarygodność wzoru (46).



Rys. 8. Związek pomiędzy poziomym naprężeniem rozciągającym na spodzie podbudowy z kruszywa stabilizowanego cementem a obciążeniem osi, dla nawierzchni półsztywnej KR3, przy różnych ciśnieniach kontaktowych q

Fig. 8. Relationship between horizontal tensile strain at the bottom of cement stabilized aggregate and axle load, for the semi-rigid pavement KR3, at different contact pressures q

Jeżeli przyjąć, że:

- $\alpha_{cem} = 0,0050$,z obliczeń (według tablicy 7) dla ciśnienia w ogumieniu $q = 650$ kPa i nawierzchni KR3 oraz
- $R_b = 0,8$ dla podbudowy stabilizowanej cementem $Rm = 3 - 5$ Mpa, obliczone jako 20% od średniej wytrzymałości na ściskanie, równej 4 MPa,

to wzór na współczynnik równoważności obciążenia osi przyjmie postać:

$$\log(F_j) = 12,121 [0,0050 (Q_j - Q_s) / 0,8] , \quad (47)$$

a stąd:

$$\log(F_j) = 0,07576 (Q_j - Q_s) , \quad (48)$$

gdzie: Q w [kN].

W tablicy 9 przedstawiono wyniki obliczeń ze wzoru (42). Jak widać współczynniki równoważności istotnie odbiegają od wzoru czwartej potęgi. Wykładnik „n” zmienia się od 6,8 do 22,3 i jest tym wyższy im większy jest ciężar osi Q_j .

Tablica 9. Wyniki obliczeń współczynników F_j i wykładników „n” dla nawierzchni półsztywnej KR3 z podbudową stabilizowaną cementem, ze wzoru (48)
Table 9. Results of calculations of factors F_j and exponents „n” for the semi-rigid pavement KR3 with a base course stabilized with cement, according to the formula (48)

Q_j	F_j	Wykładnik „n” we wzorze $F_j = (Q_j / Q_s)^n$
10	1,519E-07	6,8
20	8,694E-07	8,7
40	2,847E-05	11,4
60	0,000932	13,7
80	0,030535	15,6
100	1	–
120	32,75	19,1
140	1072,51	20,7
160	35123,68	22,3

W podobny sposób przeprowadzona przez autora analiza innych praw zmęczenia nawierzchni podatnych, półsztywnych i sztywnych będzie przedmiotem innego artykułu.



14. ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI

1. Koncepcja współczynnika równoważności obciążenia osi wprowadzona po Teście AASHTO na początku lat 1970-tych znakomicie uprościła projektowanie nawierzchni.
2. Podane w tym artykule tabelaryczne wyniki obliczeń współczynników równoważności osi według metody AASHTO, dla osi w kN oraz dla nawierzchni wg polskiego katalogu, mogą być wykorzystywane w praktyce bez specjalnych zastrzeżeń dla nawierzchni podatnych. Przy nawierzchniach półsztywnych jest to też możliwe z pewnym przybliżeniem.
3. W artykule podano proste wzory do obliczania współczynników dla osi podwójnych i potrójnych, wyprowadzone przez autora na podstawie metody AASHTO.
4. Metody AASHTO i francuska, mimo znacznych różnic postaci wzorów dają dość podobne oszacowanie współczynników równoważności obciążenia osi. Przy przeciążeniach osi z metody francuskiej uzyskuje się większe wartości. Przy obciążeniach mniejszych od ciężaru osi standardowej większe wartości uzyskuje się z metody AASHTO.
5. Wciąż nie są pewne metody określania współczynników równoważności w przypadku nawierzchni półsztywnych i sztywnych.
6. Ze względu na niepewną wartość wykładnika „n” we wzorze $F_j = (Q_j / Q_s)^n$ lepsze wyniki w projektowaniu nawierzchni półsztywnych i betonowych dałoby przyjęcie obciążenia osi standardowej równe maksymalnemu dopuszczalnemu obciążeniu osi, czyli w Polsce 115 kN. Przy projektowaniu nawierzchni podatnych ma to mniejsze znaczenie.
7. Duże przeciążenia osi są bardzo groźne dla nawierzchni.
8. Reguła Minera o sumowaniu szkód zmęczeniowych nie zawsze jest spełniona w przypadku nawierzchni asfaltowych, co ma wpływ na dokładność analizy nawierzchni.
9. Metody mechanistyczne pozwalają na obliczenia współczynników równoważności osi z uwzględnieniem różnych czynników praktycznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Cebon D.*: Handbook of Vehicle – Road Interaction. Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, 1999
- [2] *Westergaard H.M.*: Computation of Stresses in Concrete Roads. Proceedings, Highway Research Board, **5**, 1, 1926, 90-115
- [3] Highway Engineering Handbook. McGraw-Hill, New York, 1960
- [4] *Rolla S.*: Projektowanie grubości nawierzchni podatnych. Wydawnictwa Komunikacyjne, Podręcznik drogowy, **IV**, 61, Warszawa 1959



- [5] *O'Flaherty C.A.*: Highway Engineering, Edward Arnold, **II**, 301, London 1978
- [6] *Lewinowski Cz.*: Wymiarowanie podatnych nawierzchni drogowych, PWN, Warszawa 1980
- [7] Instrukcja po naznaczeniu konstrukcji dorożnych odzieżd nieżestkowo typu. Goszusz-dor, Moskwa 1954
- [8] AASHTO Interim Guides for Design of Pavement Structures. AASHTO, 1973
- [9] *Yoder E.J., Witczak M.W.*: Principles of Pavement Design. A Wiley-Interscience Publication, 15-16, New York 1975
- [10] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni jezdni podatnych. IBDiM, Warszawa 1977 (wydanie I), 1983 (wydanie II)
- [11] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkersflächen. RSTO 86, FSVA, Augsgabe 1986
- [12] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkersflächen. RSTO 01, FSVA, Augsgabe 2001
- [13] Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Design Inputs, NCHRP, **2**, Champaign, Illinois 2004
- [14] Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum dimensions in national and international traffic and maximum weights in international traffic. Official Journal of the European Community, L235, **39**, 17 September 1996
- [15] Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussee. Guide Technique, SETRA, LCPC 1994
- [16] The Structural Design of Bituminous Roads. TRRL Laboratory Report 1132, Crowthorne 1984
- [17] U.S. Department of Transportation. Comprehensive Truck and Weight Study,, Summary Report, 3, 2001
- [18] *Huang Y.H.*: Pavement Analysis and Design. Prentice-Hall, 2, 2004
- [19] AASHTO Design of Pavement Structures. AASHTO, 1993
- [20] Rolla S.: Projektowanie nawierzchni. WKiŁ, Warszawa 1987
- [21] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. IBDiM, Warszawa 1997
- [22] *Judycki J., Urbański P., Gajewski D.*: Analiza agresywności ciężkich pojazdów dopuszczonych do ruchu w Unii Europejskiej na polskie nawierzchnie drogowe. Politechnika Gdańska, Raport badawczy, Gdańsk 2003
- [23] *Judycki J., Grajewska A., Michalska P., Antoniewicz Ł.*: Raport z badań nad współczynnikami równoważności obciążenia osi. Politechnika Gdańska, 2005
- [24] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych. IBDiM, Warszawa 2001



- [25] *Molzer C. i wsp.:* Auswirkung von Achslasterhöhungen auf das Bundesstrassennetz. Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten, Wien 1995
- [26] *Huhtala M.:* Traffic loads. Monografia: Bituminous Pavements, Materials Design and Evaluation, Finland, Oulu 1995
- [27] *Judycki J.:* Fatigue of asphalt mixes. Finland, Oulu 1991
- [28] *Nunn M.E. i wsp.:* Design of long - life pavements for heavy traffic. TRL Report 250, 1997
- [29] *Claessen A.I.M., i wsp.:* Asphalt pavement Design. The Shell Method, Fourth International Conference on the Structural Design of asphalt pavements, University of Michigan, Ann Arbor 1977
- [30] *Judycki J.:* Porównanie kryteriów zmęczeniowych do projektowania podatnych i półsztywnych nawierzchni drogowych. Drogownictwo nr 1/1999

BASES FOR DETERMINATION OF THE EQUIVALENT AXLE LOAD FACTORS FOR DESIGN OF ROAD PAVEMENTS

Abstract

The paper presents outline of historical development of characteristics of traffic loading on roads. The influence of determination of equivalent standard axle load on results of traffic analysis was discussed. Experimental AASHTO method and factors calculated with use of this method for Polish conditions were presented. Formulas for calculation of factors for tandem and tridem axles were given. The French method and its comparison with the AASHTO method were presented. The analysis of the effect of determination of the exponent „n” from $n=4$ to $n=12$ on evaluation of the equivalent traffic, at various rate of overloading of axles of vehicles, were given. Theoretical bases of evaluation of equivalent axle load factors according to mechanistic methods were proposed. Examples of evaluation of factors from fatigue laws are given and practical conclusions are presented.

