

DRO-KONSULT

ul. Odrowąza 15, 03-310 Warszawa
tel.: +226144777, fax: +228110201, e-mail: warszawa@drokonsult.com.pl



OPRACOWANIE METODYKI SIECIOWEJ OCENY NOŚNOŚCI NAWIERZCHNI NA PODSTAWIE POMIARU UGIĘĆ POD OBCIĄŻENIEM DYNAMICZNYM

Zleceniodawca: GDDKiA Department Studiów

Umowa: 12/3.2/08

**Opracowanie: Andrzej Janowski
Joanna Sarbiewska
Małgorzata Klatka-Gigiel**

Warszawa, wrzesień 2008



Spis treści

| | |
|---|---|
| 1. Wstęp..... | 2 |
| 2. Ocena nośności drogi | 3 |
| 2.1. Metody oparte na pomiarze ugięć | 3 |
| 2.1.1. Obliczenia mechanistyczne | 3 |
| 2.1.2. Wskaźniki związane z ugięciami..... | 5 |
| 2.2. Metody związane ze stanem powierzchni i mieszane | 6 |
| 3. Proponowana metodologia oceny nośności drogi na sieci drogowej | 8 |
| 4. Skala i klasyfikacja oceny nośności drogi..... | 11 |
| 4.1. Skala zależna od natężenia ruchu | 11 |
| 4.2. Skala zależna od konstrukcji nawierzchni i natężenia ruchu | 12 |
| 4.3. Klasyfikacja nośności drogi | 14 |
| 4.4. Agregacja danych..... | 18 |
| 5. Ocena nośności dla potrzeb ewidencji dróg | 19 |
| 6. Wnioski | 21 |
| Bibliografia..... | 21 |
| Załącznik nr 1 | Błąd! Nie zdefiniowano zakładki. |



1. Wstęp

Pojęcie nośności nawierzchni jest jednym z najbardziej niejednoznacznych pojęć w drogownictwie, rozumianym na różne sposoby a często nie rozumianym w ogóle. Według [1] nośność jest to „zdolność do przenoszenia obciążeń od ruchu drogowego”. Definicja ta jest mało użyteczna. A jak rozumieć prawny [2] wymóg podania nośności drogi w kN/oś? Co oznacza spotykane sformułowanie „podniesienie nośności nawierzchni do 115 kN”? Czy zanim wzmocniono nawierzchnię pojazdy o takim nacisku osi powodowały natychmiastowe zniszczenie drogi? Oczywiście nie, ale trwałość takiej nawierzchni zmniejszała się w szybszym tempie. Ta intuicja jest właśnie kluczem do bardziej ścisłego, ilościowego, zdefiniowania nośności drogi. Nośność można zatem wartościować (dobra, zadowalająca, niezadowalająca, zła itp.) na podstawie czasu (pozostała trwałość) jaki pozostał do momentu utraty nośności.

Nawierzchnia drogi powinna mieć nośność zapewniającą przy obecnym i prognozowanym obciążeniu ruchem wymaganą przepisami trwałość [4]. Do obliczenia pozostałej trwałości nawierzchni można wykorzystać tak zwane funkcje zmęczenia opisujące zależność między wielkością obciążenia, mechanicznymi właściwościami konstrukcji a dopuszczalną liczbą obciążeń. Funkcje konstruowane są tak aby wskazany przez nie moment wyczerpania trwałości odpowiadał mierzalnemu stopniowi uszkodzenia nawierzchni. I tak, na przykład kryterium zmęczenia Instytutu Asfaltowego USA odpowiada w przybliżeniu wystąpieniu spękań zmęczeniowych na 20 % powierzchni jezdni [3]. Ponieważ obliczenia takie są trudne (w skali sieci praktycznie niewykonalne), należy znaleźć łatwo mierzalny parametr, którego wartość jest związana z liczbą obciążeń nawierzchni (czyli z czasem).

Można rozważać dwa główne podejścia do sieciowej oceny nośności nawierzchni:

1. Ocena wykorzystująca wielkość i kształt ugięcia nawierzchni pod obciążeniem.
2. Ocena na podstawie uszkodzeń nawierzchni.

Pierwszą z wymienionych koncepcji można realizować na wiele sposobów:

- O stanie nawierzchni a więc pośrednio o nośności można wnioskować wykonawszy tzw. obliczenia odwrotne, które dają wiedzę o modułach sprężystości poszczególnych warstw konstrukcyjnych. Obliczenia takie napotykają na szereg trudności. Nie zawsze jest możliwe wykonanie obliczeń odwrotnych, w szczególności gdy konstrukcja nie spełnia warunków modelu obliczeniowego, wymagana jest dokładna znajomość konstrukcji, zawilgocenie materiałów ziarnistych i temperatura warstw bitumicznych wpływa na wyniki.
- Metoda dająca bardziej bezpośredni wynik (trwałość), wyznaczony w oparciu o obliczenia odwrotne i funkcje zmęczenia. Oprócz wymienionych wyżej trudności pojawiają się kolejne kroki postępowania wprowadzające dodatkową niepewność do oceny. Poza wyznaczeniem faktycznych modułów sprężystości, należy obliczyć rozkład naprężeń i odkształceń w nawierzchni wywołanych przez pojazdy a następnie korzystając z funkcji zmęczenia wyliczyć dopuszczalną liczbę obciążeń danej nawierzchni.
- Biorąc pod uwagę powyższe zastrzeżenia oraz dużą pracochłonność wymienionych procedur, dla poziomu sieci atrakcyjna jest pośrednia ocena nośności. Dla nawierzchni o znanych konstrukcjach wyznacza się związek między wybranymi parametrami czasu ugięcia nawierzchni oraz trwałością nawierzchni wyznaczoną w inny sposób, czy to drogą obliczeń mechanistycznych czy przyspieszonych badań drogowych. Posiada-



jąc taką relację w wyniku pojedynczego pomiaru oraz prostych obliczeń można określić trwałość, a więc nośność nawierzchni.

W drugiej koncepcji przyjmuje się, że uszkodzenie nawierzchni takie jak pęknięcia różnych rodzajów, skoleinowanie, nierówności są w pewnym stopniu spowodowane nośnością nieodpowiednią do obciążenia ruchem i odwrotnie, występowanie w szczególności pęknięć powoduje przyspieszone wyczerpanie trwałości nawierzchni. Stąd też rozważa się próby oceny nośności na podstawie zakresu widocznych uszkodzeń nawierzchni.

2. Ocena nośności drogi

2.1. Metody oparte na pomiarze ugięć

2.1.1. Obliczenia mechanistyczne

Obliczenie trwałości nawierzchni metodą mechanistyczną składa się z kilku kroków:

1. Obliczenie modułów sprężystości poszczególnych warstw konstrukcyjnych nawierzchni.
2. Obliczenie naprężeń i odkształceń pod wpływem obciążenia umownego w krytycznych miejscach nawierzchni, której warstwy posiadają wyznaczone w pkt 1 właściwości mechaniczne.
3. Obliczenie, z wykorzystaniem funkcji zmęzeniowych, liczby powtórzeń obciążenia wywołującego odkształcenia i naprężenia wyznaczone w pkt 2, prowadzącej do powstania uszkodzeń przyjmowanych jako kryterium w funkcji zmęzeniowej.
4. Na podstawie prognozy ruchu i dopuszczalnej liczby obciążeń z pkt 3, wyznaczenie pozostałej trwałości tj. okresu czasu do pojawienia się zakresu uszkodzeń uznawanych za przejaw wyczerpania trwałości.

Do wykonania obliczeń odwrotnych czyli wyznaczenia modułów sprężystości nawierzchni posłużono się programem ELMOD 5.1. W tym celu tworzony jest model obliczeniowy nawierzchni, który musi spełnić kilka warunków:

- konstrukcja powinna zawierać tylko jedną warstwę sztywną ($E/E_{\text{podłoże}} > 5$),
- moduły sprężystości powinny maleć z głębokością ($E_i/E_{i+1} > 2$),
- grubość górnej warstwy powinna być większa niż połowa promienia kołowej powierzchni nacisku,
- w konstrukcjach trójwarstwowych grubość górnej warstwy powinna być mniejsza niż średnica kołowej powierzchni nacisku oraz mniejsza niż grubość drugiej warstwy ($H_1 < H_2$),
- liczba warstw nie może przekraczać 4,

Proces polega na iteracyjnym dobieraniu wartości modułów sprężystości i obliczaniu czasu ugięcia dopóki z zadaną dokładnością nie zostanie odtworzone rzeczywiste, pomierzone ugięcie. Miarą dokładności dopasowania jest wartość odchylenia standardowego różnic między wartością pomiaru dokonywanego w siedmiu punktach czasu ugięcia a wartością ugięcia obliczonego w tych punktach.

Wspomniany program ELMOD wykorzystano do łącznego wykonania dwóch kolejnych etapów obliczeń. Moduły sprężystości, wyznaczone podczas obliczeń odwrotnych, oraz grubości warstw w przyjętym modelu obliczeniowym posłużyły jako dane wejściowe do obliczenia rozkładu naprężeń i odkształceń w konstrukcji pod naciskiem 50 kN przyłożonym do powierzchni kołowej o średnicy 300 mm. Obliczenia trwałości nawierzchni wykonano przyjmując poniższe funkcje zmęzeniowe:



a) pęknięcia zmęczeniowe warstw bitumicznych [5]:

$$(1) \quad N = 113.473 \cdot 10^{-5} \cdot C \cdot \varepsilon_t^{-3.291} \cdot E^{-0.854}$$

gdzie

$$(2) \quad C = 10^M, \quad M = 4.84 \cdot \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

- ε_t - poziome odkształcenie na spodzie warstw bitumicznych [10^{-6}],
 N - dopuszczalna liczba obciążeń (powodujących odkształcenie ε_t),
 E - moduł sprężystości betonu asfaltowego [MPa],
 V_a - objętościowa zawartość asfaltu [%],
 V_b - zawartość pustej przestrzeni [%].

b) trwałe odkształcenie warstw ziarnistych (włącznie z podłożem gruntowym) [5]:

$$(3) \quad \varepsilon_p = 1.05 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.223}$$

- ε_p - pionowe odkształcenie na górze warstwy ziarnistej [10^{-6}],
 N - dopuszczalna liczba obciążeń (powodujących odkształcenie ε_p);

c) pęknięcia zmęczeniowe warstw związanych cementem [6]:

$$(4) \quad \ln N = 11.784 - 12.121 \cdot \left(\frac{\sigma}{R_b} \right)$$

- σ - naprężenie w warstwie związanej cementem [MPa],
 R_b - wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa],
 N - dopuszczalna liczba obciążeń (powodujących naprężenie σ).

Ponadto przyjęto szereg parametrów pochodzących z badań laboratoryjnych lub polowych.

Temperatury warstw bitumicznych

- 2 °C w okresie zimowym,
- +10 °C w okresie wiosny i jesieni,
- +23 °C w okresie lata.

Właściwości materiałów bitumicznych

- Objętościowa zawartość asfaltu: 9.0 %
- Zawartość wolnych przestrzeni: 7.9 %

Współczynniki agresywności pojazdów, wykorzystane do obliczenia liczby standardowych obciążeń oraz roczne rozkłady natężenia ruchu przyjęto według katalogu typowych konstrukcji nawierzchni [7]:

- w okresie zimowym nawierzchnia przenosi 20.0 %, rocznego ruchu,
- w okresie letnim 30.0 %, rocznego ruchu,
- w okresie wiosny i jesieni łącznie 50.0 % rocznego ruchu.



Obliczona w przedstawiony wyżej sposób liczba obciążeń, którą nawierzchnia może przemieścić do powstania uszkodzeń strukturalnych według kryteriów (1), (3) albo (4), w połączeniu z natężeniem ruchu daje oszacowanie liczby lat pozostałej eksploatacji do wyczerpania trwałości czyli ocenę nośności.

2.1.2. Wskaźniki związane z ugięciami

Obliczenia mechanistyczne są dość kłopotliwe, do wykonania ich wymagana jest:

- dokładna znajomość konstrukcji,
- znajomość zawilgocenia materiałów ziarnistych i temperatury warstw bitumicznych znacząco wpływających na wyniki,

ponadto gdy konstrukcja nie spełnia warunków modelu obliczeniowego nie jest możliwe wykonanie godnych zaufania obliczeń odwrotnych. Oprócz wymienionych trudności, kolejne kroki postępowania - obliczanie rozkładu naprężeń i odkształceń w nawierzchni wywołanych przez pojazdy oraz wyznaczanie dopuszczalnej liczby obciążeń danej nawierzchni z wykorzystaniem z funkcji zmęzeniowych, wprowadzają dodatkową niepewność do oceny nośności. Nie można także nie uwzględnić dużej pracochłonności tej procedury w zastosowaniu do sieci dróg.

Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania atrakcyjna byłaby metoda oceny nośności korzystająca z parametru, w prosty sposób tworzonego z wyniku pomiaru czaszy ugięcia, w statystyczny sposób łącząca wartość parametru z oceną. Związek statystyczny oznacza, że za cenę błędu popełnianego w konkretnych przypadkach (miejscach pomiaru ugięć) można uniknąć szczegółowej wiedzy o konstrukcji nawierzchni.

Wymieńmy niektóre z parametrów uzyskiwane z pomiaru aparatem typu FWD/HWD:

- d_0 - ugięcie maksymalne,
- SCI_r - wskaźnik krzywizny powierzchni: d_0-d_r ,
- BDI - wskaźnik uszkodzenia podbudowy: $d_{300}-d_{600}$,
- BCI - wskaźnik krzywizny podbudowy: $d_{600}-d_{900}$,
- A - powierzchnia: $6[1+2(d_{300}/d_0)+2(d_{600}/d_0)+d_{900}/d_0]$,
- F_1, F_2 - czynniki kształtu: $(d_0-d_{600})/d_{300}$, $(d_{300}-d_{900})/d_{600}$.

We wszystkich powyższych formułach d_r oznacza wielkość ugięcia w odległości r od środka obszaru przyłożenia nacisku (mm).

Badania wykazują, że wskaźniki krzywizny dobrze korelują z odkształceniami na spodzie warstw bitumicznych, które są bardzo istotne dla trwałości nawierzchni, przy czym opracowanych zależności jest cała mnogość [8], [9], dlatego też uważa się, że wskaźniki krzywizny powierzchni są najlepszymi miarami nośności nawierzchni.

Poniżej podano przykłady zależności pozostałej trwałości RL i parametrów ugięcia dynamicznego [10], [11]:

$$(5) \quad RL = \text{Min}\left((0.207 \cdot d_0)^{-9.8}, (0.29 \cdot SCI_{200})^{-4.7}\right)$$

gdzie trwałość jest wyrażona w osiach standardowych (obliczeniowych) 100 kN, $SCI_{200} = d_0-d_{200}$, ugięcie d jest wyrażane w mm.

$$(6) \quad N_{10} = 10^{7.169 - 0.0074 \cdot SCI_{300} - 2899829 \cdot \left(\frac{1}{SCI_{300} \cdot N_{10}}\right)}$$



gdzie N_{10} jest zakumulowaną liczbą osi standardowych 100 kN do zainicjowania pęknięć zmęczeniowych, NY_{10} jest roczną liczbą osi standardowych 100 kN obciążających nawierzchnię.

2.2. Metody związane ze stanem powierzchni i mieszane

Koncepcja wskaźnika strukturalnego SN (Structural Number) powstała w USA podczas AASHO Road Test, jest on stosowany jako parametr projektowy nawierzchni (AASHTO Guide for Design of Pavement Structures) oraz wskaźnik nośności. Również system zarządzania nawierzchniami HDM korzysta z tej miary nośności w postaci zmodyfikowanej, uwzględniającej wpływ podłoża gruntowego, oznaczanej dla odróżnienia SNP [12].

$$(7) \quad \text{SNP} = 0.0394 \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot H_i + \text{SNSG}$$

a_i - stabelaryzowane współczynniki,

H_i - grubość (mm) i - tej warstwy, suma ≤ 700 mm,

n - liczba warstw konstrukcyjnych,

SNSG - wkład podłoża do wskaźnika:

$$(8) \quad \text{SNSG} = 3.51 \cdot \lg \text{CBR} - 0.85 \cdot (\lg \text{CBR})^2 - 1.43$$

CBR - Kalifornijski Wskaźnik Nośności *in situ*.

Wskaźnik SN obliczany jest ze znajomości grubości warstw konstrukcyjnych nawierzchni i użytych materiałów tym niemniej znane są formuły wzajemnego przeliczania ugięć nawierzchni i SNP, [12]:

przy podbudowie nie stabilizowanej:

$$(9) \quad \text{SNP} = 3.2 \cdot d_0^{-0.63}$$

przy podbudowie stabilizowanej:

$$(10) \quad \text{SNP} = 2.2 \cdot d_0^{-0.63}$$

gdzie: d_0 - ugięcie maksymalne (mm) przy temperaturze warstw asfaltowych 30 °C!

oczywiście są i inne formuły, na przykład [13]:

$$(11) \quad \text{SN} = 0.4728 \cdot (d_0 - d_{15-H_p})^{-0.4810} \cdot H_p^{0.7581}$$

gdzie: H_p jest całkowitą grubością nawierzchni (mm).

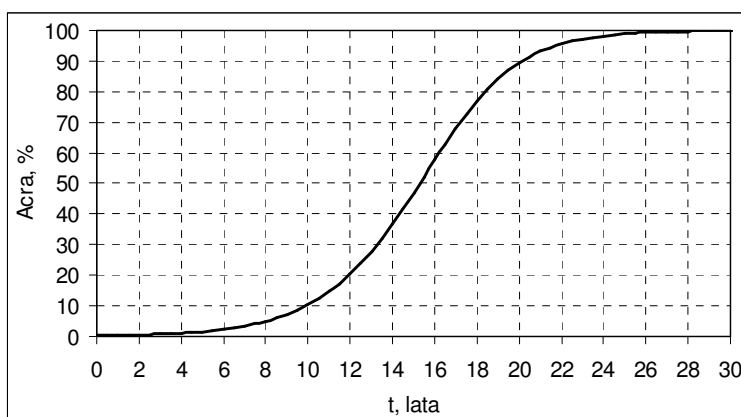
Stosowanie wskaźnika nośności wymaga jednak dobrej znajomości konstrukcji nawierzchni a ponadto bardzo słabo i subiektywnie odzwierciedla aktualny stan nośności, raczej poprzez powyższe zależności statystyczne ((9) - (11)), nie ma zatem żadnej przewagi nad prostymi (np. d_0 , SCI) parametrami wyznaczonymi z pomiaru ugięć.

Rozważmy związek różnych innych parametrów nawierzchni z nośnością:

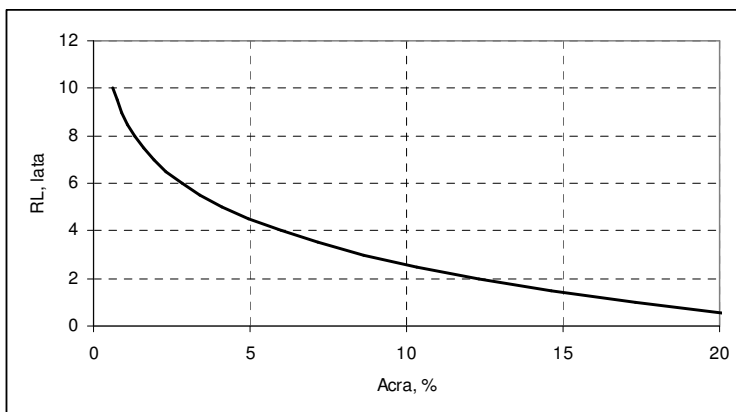
- Ubytki – nie mają związku.
- Koleiny – koleiny powstają w wyniku deformacji plastycznych lub ubytku materiału co nie ma żadnego związku nośnością albo na skutek strukturalnych zmian w nawierzchni (trwałe deformacje podbudowy lub podłoża gruntowego). Aby identyfikować przyczyny koleinowania konieczna jest rejestracja całego profilu poprzecznego. Nie jest także znany związek między wielkością kolein strukturalnych a trwałością nawierzchni.



- Równość podłużna – istnieje związek równości podłużnej z utratą nośności, jak wiadomo jednak na równość wpływają również inne czynniki, w szczególności jakość wykonawstwa, zatem ten parametr może być wykorzystywany tylko wyjątkowo.
- Wyboje – są fazą degradacji nawierzchni występującą po spękaniach siatkowych, są ponadto znacznikiem dychotomicznym (jest - nie ma) gdyż trudno uważać za nośny, odcinek na którym pojawił się chociaż jeden wybój, tak więc nie znajdują zastosowania w rozważanym problemie.
- Pęknięcia wszelkiego rodzaju – a priori nie można zanegować ich użyteczności gdyż biorąc pod uwagę analityczny model rozwoju pęknięć [12], przedstawiony na Rys. 1, po jego odwróceniu mamy związek pozostałej trwałości z wielkością uszkodzonej powierzchni jak na Rys. 2.



Rys. 1. Model rozwoju powierzchni pęknięć nawierzchni. Acra – powierzchnia pokryta pęknięciami.



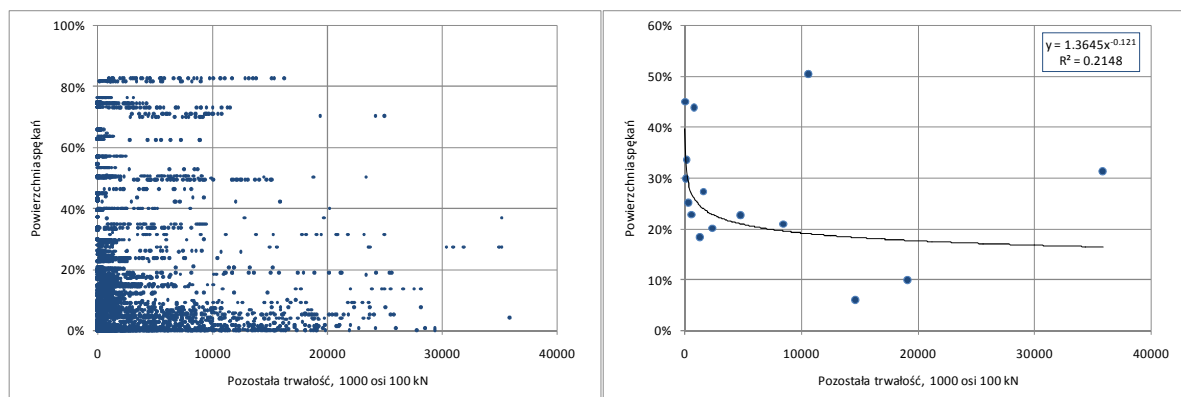
Rys. 2. Teoretyczna zależność pozostałej trwałości Acra od powierzchni pokrytej pęknięciami RL.

Pęknięcia mogą nie przecinać całej grubości warstw bitumicznych znajdujących się nad podbudową. Jeśli pęknięcia propagują się od góry wówczas nośność może być niedoszacowana – brane są pod uwagę mało jeszcze groźne pęknięcia, jeśli propagują się od dołu, nośność może być przeszacowana – nie są uwzględniane pęknięcia już istniejące. Możliwość takich błędów dodatkowo zmniejsza przydatność analizy spękań do oceny nośności nawierzchni. Istotnie, badanie przeprowadzone na danych DOT nie ujawniają istotnego związku między powierzchnią pęknięć zmęczeniowych a którymkolwiek parametrami ugięcia nawierzchni.

Badania z wykorzystaniem danych DOT z lat 1999 – 2008 potwierdzają wątpliwą przydatność pęknięć nawierzchni jako jedyne go wskaźnika oceny nośności. Zestawienie pozostałej trwałości i zakresu spękań przedstawiono na Rys. 3. Nie tylko nie ma możliwości znalezienia trendu przydatnego



do stworzenia metody oceny nośności ale również obwieśnia, poprowadzona przez percentyl 80 % rozkładu spękań, nie daje takiej szansy. Jeszcze gorzej przedstawia się sytuacja gdy brane są pod uwagę tylko pęknięcia szerokie: o rozwarciu powyżej 3 mm lub wykruszone.



Rys. 3. Powierzchnia spękana Acra w zależności od Pozostałej trwałości wyrażonej w osiach obliczeniowych 100 kN. Wykres prawy ilustruje zależność dla percentylu 80 %.

Wiązanie oceny nośności z pomiarem ugięć i oceną stanu pęknięć nawierzchni (np. [14], [15]) wydaje się być nieuzasadnione gdyż czasochłonność i koszty zbliżają się do metod mechanicznych (pkt 2.1.1).

3. Proponowana metodologia oceny nośności drogi na sieci drogowej

W niniejszej pracy zbadany został związek maksymalnego ugięcia oraz wskaźników krzywizny powierzchni z trwałością obliczaną w procedurze przedstawionej w pkt 2.1.1.

Wszystkie ugięcia, zarówno maksymalne jak i tworzące wskaźniki krzywizny są znormalizowane do nacisku 50 kN na kołowej powierzchni o promieniu 0.15 m (naprężenie 707.36 kPa) oraz do temperatury 20 °C według wzoru:

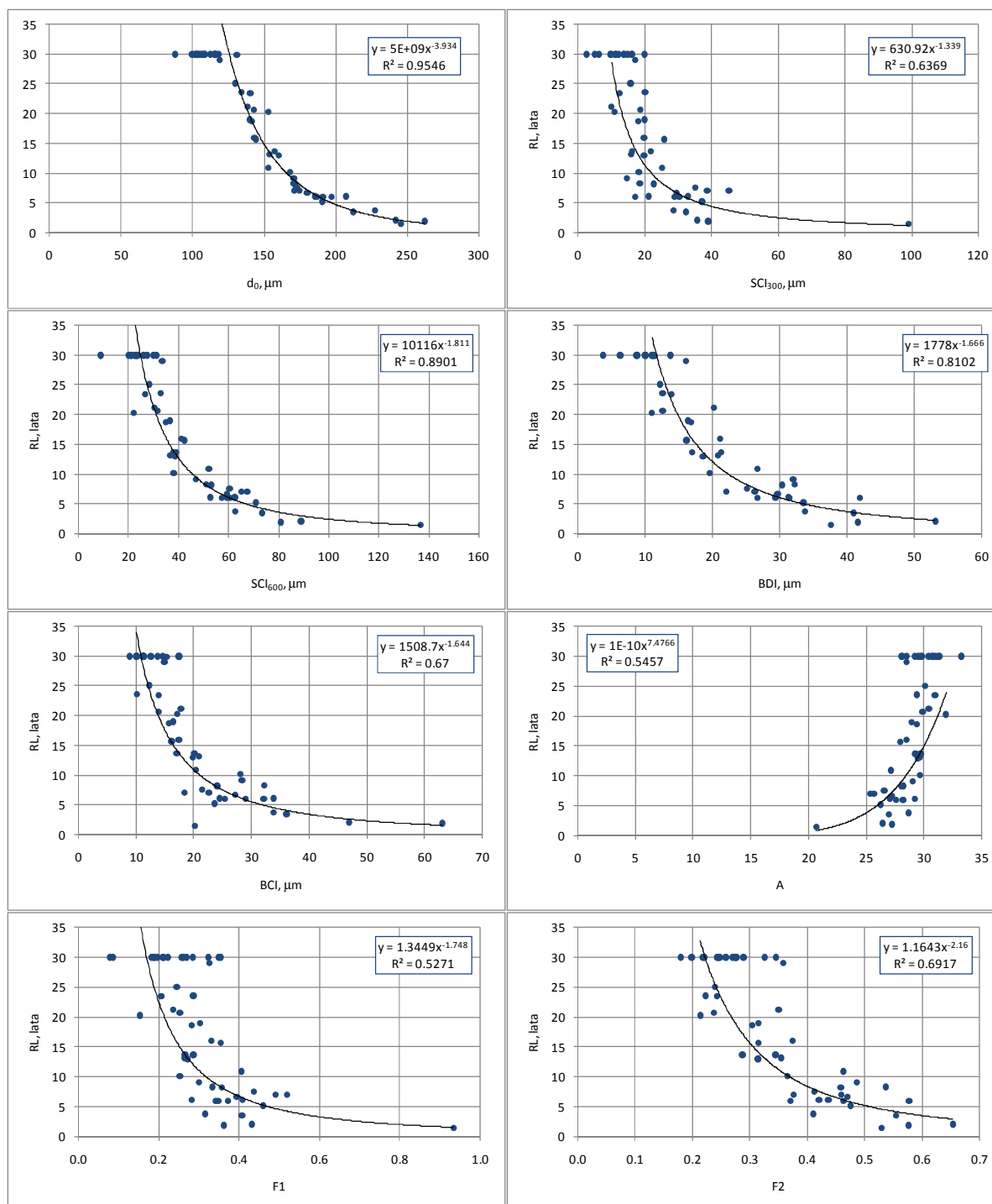
$$(12) \quad d = D \cdot \frac{707.36}{P} \cdot (1 + 0.02 \cdot (20 - T_b))$$

Do badań wykorzystano dane z 37947 pomiarów ugięcia wykonywanych w latach 1992 – 2008 na Długoterminowych Odcinkach Testowych. Dobre rozpoznanie odcinków pod względem konstrukcyjnym umożliwia wykonanie możliwie najbardziej wiarygodnych obliczeń pozostałej trwałości.

W pierwszej kolejności zestawiono różne wskaźniki ugięć z pozostałą trwałością. Zależność ta posiada dwie charakterystyczne cechy:

1. w zakresie małych wartości parametru (sztywne nawierzchnie) trwałość wynosi nie mniej niż 30 lat,
2. przy większych wartościach parametru następuje potęgowy spadek pozostałej trwałości.

Przykład takiej zależności przedstawiono dla jednego z odcinków na Rys. 4



Rys. 4. Przykład związku pozostałej trwałości z wskaźnikami kształtu ugięcia, pkt 2.1.2.

Widać, że powierzchnia A oraz czynniki kształtu F1, F2 nie wykazują dobrego funkcyjnego związku z pozostałą trwałością, o czym świadczą małe wartości współczynnika dopasowania R²: nawierzchnia przy tej samej wartości parametru może mieć trwałość zarówno około 30 lat jak i 5 lat.

Do dalszych badań zostanie wybrany ten wskaźnik, który dobrze da się aproksymować typową funkcją a jednocześnie wykaże największą rozdzielczość tzn. będzie najszybciej zmieniał się wraz z pozostałą trwałością. Dzięki temu błąd w pomiarze ugięcia (spowodowany na przykład warunkami klimatycznymi) będzie skutkował najmniejszą zmianą wyniku w postaci pozostałej trwałości.



Najlepsze pod tym względem okazało się maksymalne ugięcie. Średnie wartości wykładnika funkcji modelującej związek pozostałej trwałości i parametru związanego z ugięciem, odzwierciedlające rozdzielczość zależności, zestawiono w Tab. 1.

Tab. 1. Średnie wartości wykładnika oraz dopasowania zależności pozostałej trwałości (lata) od parametru ugięcia.

| Parametr ugięcia | Średni wykładnik funkcji $RL=a \cdot x^b$ | Współczynnik dopasowania R^2 |
|--------------------|---|--------------------------------|
| d_0 | -3.2511 | 0.8184 |
| SCI ₃₀₀ | -1.4959 | 0.6488 |
| SCI ₆₀₀ | -1.8741 | 0.7977 |
| BDI | -1.9230 | 0.6994 |
| BCI | -2.2573 | 0.5604 |

Współczynniki dopasowania są podobnie wysokie dla ugięcia maksymalnego d_0 oraz SCI₆₀₀ (ponieważ d_0 daje główny wkład do tego parametru), natomiast dla pozostałych parametrów są wyraźnie mniejsze, co tym bardziej wyklucza je z korzystania dla celów oceny nośności.

Szybkość zmian pozostałej trwałości w zależności od parametru dla d_0 i SCI₆₀₀ jest niemal taka sama i wynosi 0.42 roku/ μm dla wartości równej medianie analizowanego zbioru parametrów¹.

Przedstawione wyżej wyniki wskazują najbardziej użytecznym parametrem będzie ugięcie maksymalne i jego powiązanie z pozostałą trwałością za pomocą funkcji potęgowej.

Zestawienie parametrów ugięć z pozostałą trwałością wykonano kategoryzując zbiór danych:

- Po pierwsze kryterium podstawowego podziału są kategorie ruchu przewidziane prawem [16].
- Po drugie jako kryterium podziału przyjęto rodzaj konstrukcji. Zgodnie z klasyfikacją konstrukcji uogólnionej stosowaną w projekcie Długoterminowych Odcinków Testowych:
 - Nawierzchnie asfaltowe o grubości do 10 cm na podbudowie rozdrobnionej lub z bruku/kostki na warstwie ziarnistej (1).
 - Nawierzchnie asfaltowe o grubości ponad 10 cm na podbudowie rozdrobnionej lub z bruku/kostki na warstwie ziarnistej (2).
 - Nawierzchnie asfaltowe o grubości do 10 cm na podbudowie z chudego betonu lub z bruku/kostki na warstwie stabilizowanej lub na warstwie stabilizowanej (3).
 - Nawierzchnie asfaltowe o grubości ponad 10 cm na podbudowie z chudego betonu lub z bruku/kostki na warstwie stabilizowanej lub na warstwie stabilizowanej (4).

W żadnej z grup ruchu i konstrukcji nie można wskazać funkcyjnego związku trwałości i wielkości ugięcia o rozsądnej dokładności, tym niemniej zauważamy, że istnieją obszary potencjalnych kombinacji trwałość – ugięcie, które nie zdarzają się w rzeczywistości. Można to ująć następująco: jeżeli ugięcie jest mniejsze od d_{0x} to trwałość nawierzchni jest większa od N lat z prawdopodobieństwem p dla drogi o określonej kategorii ruchu, lub drogi o określonej

¹ Szybkość zmian funkcji opisuje jej pochodna. Dla d_0 będzie to: $-20942381836.8 \cdot d_0^{-4.2511}$, dla SCI₃₀₀: $-18954.9 \cdot \text{SCI}_{300}^{-2.4959}$. Porównanie szybkości zmian (rozdzielczości funkcji) dokonano dla median, które wynoszą dla d_0 329.3 μm , dla SCI₃₀₀ 72.9 μm .



kategoriach ruchu i grupie konstrukcji uogólnionej (w zapisie symbolicznym: $d_0 < d_{0x} \Rightarrow P(RL > N) = p$).

Dzieląc zakres możliwych ugięć nawierzchni na około 20 przedziałów określa się w każdym z nich percentyl p rozkładu pozostałych trwałości. Uzyskany w ten sposób zbiór par liczb ugięcie (wartość środkowa przedziału) – pozostała trwałość (percentyl p) aproksymuje się najlepiej dopasowaną funkcją. Określając pozostałą trwałość, wygodniej niż czasem, jest posługiwać się liczbą obciążeń osią standardową R_{RL}

$$(13) \quad R_{RL} = f(d_0)$$

Do stworzenia skali ocen należy posłużyć się funkcją odwrotną:

$$(14) \quad d_0 = f^{-1}(R_{RL})$$

Ustalenie skali ocen nośności polega zatem na wyborze progowych wartości czasu pozostałego do wyczerpania nośności.

Jak pokazano wyżej najwłaściwszą funkcją do opisanie relacji RL i d_0 jest funkcja potęgowa:

$$(15) \quad R_{RL} = a \cdot d_0^b$$

i odwrotnie:

$$(16) \quad d_0 = \frac{R_{RL}^{\frac{1}{b}}}{a}$$

Analogiczne zależności można zapisać gdy miarą pozostałej trwałości jest liczba osi obliczeniowych jaką można obciążyć nawierzchnię do wyczerpania nośności. Dalej, w celu łatwiejszego opracowania skali dla dróg o różnych kategoriach ruchu, będziemy posługiwali się tą właśnie miarą.

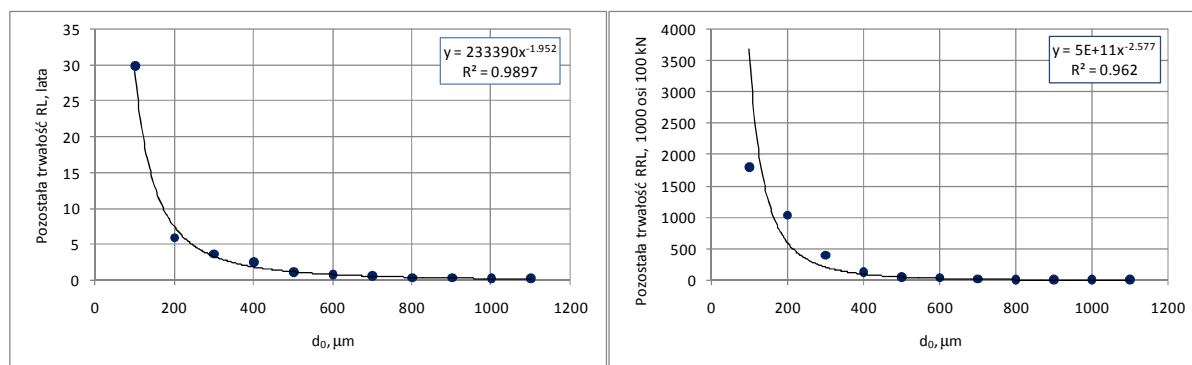
4. Skala i klasyfikacja oceny nośności drogi

4.1. Skala zależna od natężenia ruchu

Metodologię opisaną w pkt 3 zastosowano do danych z pomiarów ugięć i wyników obliczeń trwałości po odrzuceniu danych, dla których trwałość została wyczerpana. Wyniki analizy przedstawiono na Rys. 5. Zależności między standaryzowanym ugięciem a pozostałą trwałością wyrażoną w latach (RL) lub osiach obliczeniowych 100 kN (RRL) mają następującą postać:

$$(17) \quad RL = 233389.8 \cdot d_0^{-1.9517}$$

$$(18) \quad RRL = 5.25876 \cdot 10^{11} \cdot d_0^{-2.5771}$$



Rys. 5. Trwałość nawierzchni w zależności od ugięcia standaryzowanego.

Tutaj, pod terminem ugięcie standaryzowane, należy rozumieć kwanty 20 % dla rozkładów trwałości w kolejnych przedziałach ugięcia o szerokości 100 μm.

4.2. Skala zależna od konstrukcji nawierzchni i natężenia ruchu

Taką samą procedurę jak dla wszystkich danych zastosowano dla grup danych wyróżnionych według typu konstrukcji, zgodnie z ich opisem w pkt 3.

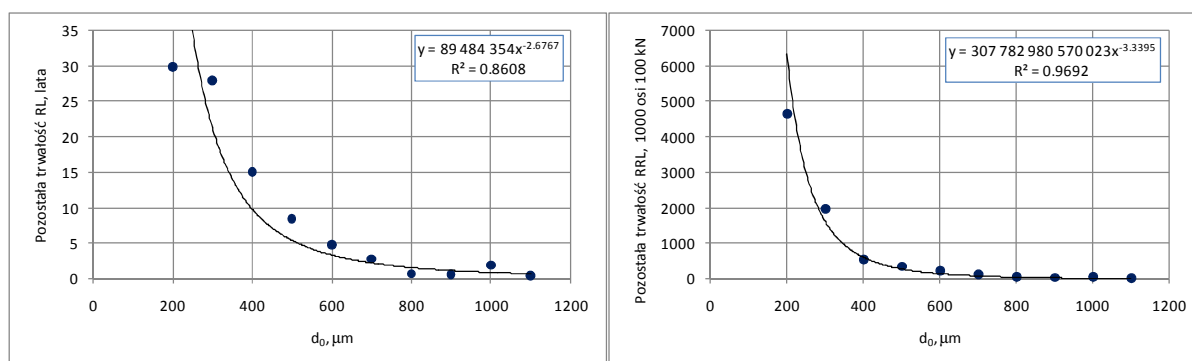
Wyniki analizy przedstawiono na Rys. 6 do Rys. 9. Zależności między standaryzowanym ugięciem a pozostałą trwałością wyrażoną w latach (RL) lub osiach obliczeniowych 100 kN (RRL) są wyrażone wzorami (19) do (26).

Wyraźna jest różnica między nawierzchniami podatnymi i półsztywnymi. Te ostatnie przy tej samej wielkości ugięcia wykazują kilkukrotnie mniejszą trwałość.

Nawierzchnie o konstrukcji typu 1.

$$(19) \quad RL = 89484354.1 \cdot d_0^{-2.6767}$$

$$(20) \quad RRL = 3.07783 \cdot 10^{14} \cdot d_0^{-3.3395}$$

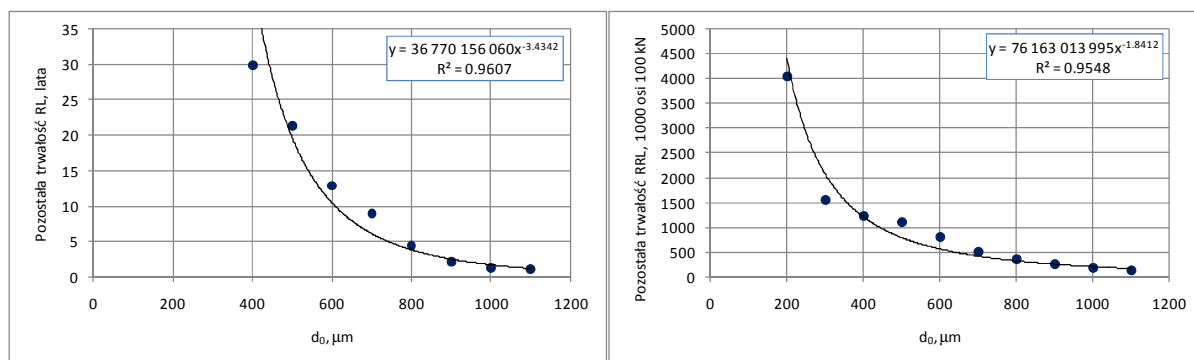


Rys. 6. Trwałość nawierzchni w zależności od ugięcia standaryzowanego dla konstrukcji typu 1.

Nawierzchnie o konstrukcji typu 2.

$$(21) \quad RL = 36770156059.6 \cdot d_0^{-3.4342}$$

$$(22) \quad RRL = 7.61630 \cdot 10^{10} \cdot d_0^{-1.8412}$$

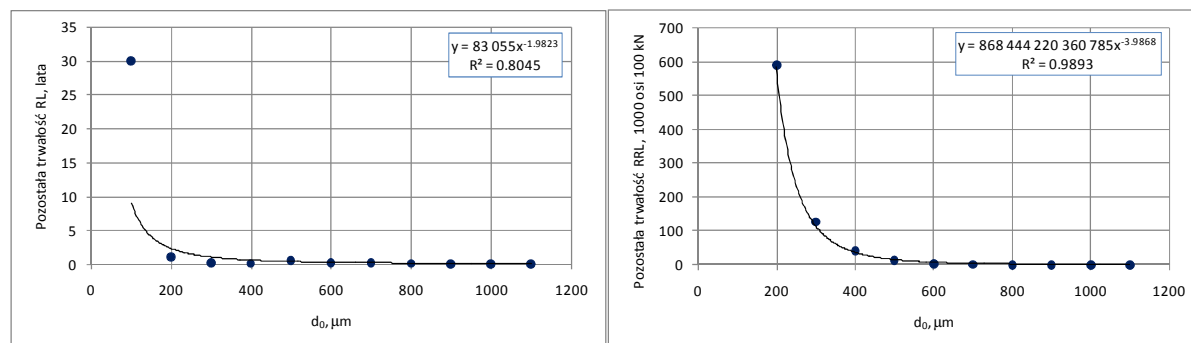


Rys. 7. Trwałość nawierzchni w zależności od ugięcia standaryzowanego dla konstrukcji typu 2.

Nawierzchnie o konstrukcji typu 3.

$$(23) \quad RL = 83055.3 \cdot d_0^{-1.9823}$$

$$(24) \quad RRL = 1.04615 \cdot 10^{13} \cdot d_0^{-3.3084}$$

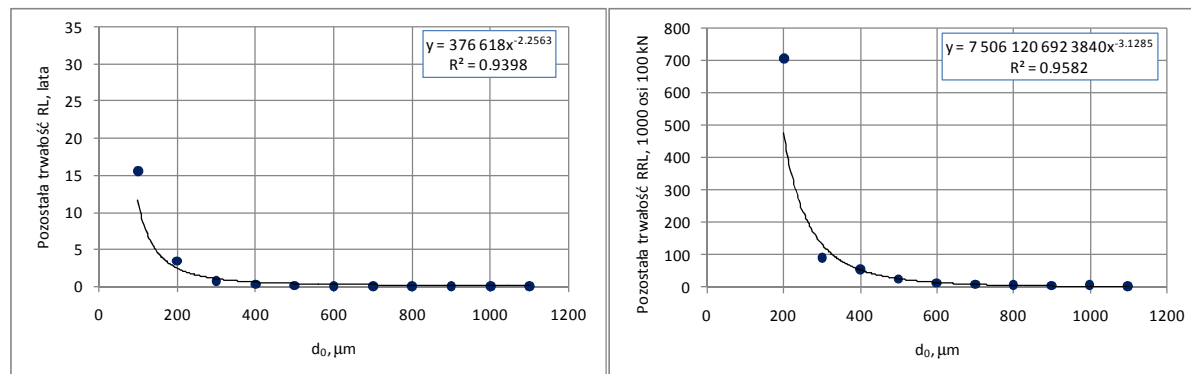


Rys. 8. Trwałość nawierzchni w zależności od ugięcia standaryzowanego dla konstrukcji typu 3.

Nawierzchnie o konstrukcji typu 4.

$$(25) \quad RL = 376617.5 \cdot d_0^{-2.2564}$$

$$(26) \quad RRL = 7.50612 \cdot 10^{12} \cdot d_0^{-3.1286}$$



Rys. 9. Trwałość nawierzchni w zależności od ugięcia standaryzowanego dla konstrukcji typu 4.



4.3. Klasyfikacja nośności drogi

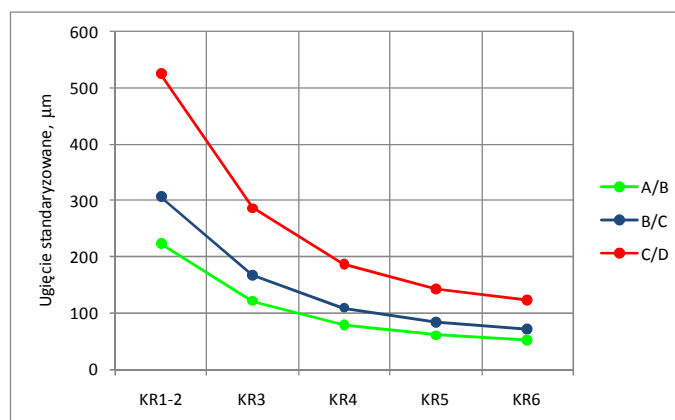
Proponuje się przyjęcie następujących definicji progów między klasami nośności:

- 2 lata jako granica między klasą C i D. Nawierzchnia w klasie D wymaga prawdopodobnie pilnej interwencji, dwa lata jest to okres wystarczający do przeprowadzenia badań i ewentualnie przygotowania remontu (projekt, przetarg) przed wyczerpaniem trwałości.
- 8 lat jako granica między klasą B i C. Długość okresu klasy C odpowiada w przybliżeniu typowemu okresowi międzyremontowemu, a zatem prawdopodobna konieczność naprawy stanu funkcjonalnego zbiega się z wyczerpaniem trwałości nawierzchni i koniecznością wzmocnienia.
- 18 lat jako granica między klasą A i B. Nawierzchnia w klasie A powinna mieć nośność zbliżoną do nośności nawierzchni nowej, tj. zgodnie z przepisami 20 lat, [16].

Przyjmując, że największa dla danej kategorii wartość obciążenia ruchem w zadanym okresie czasu odpowiada pozostałej trwałości, wzór (18), obliczane są progowe wartości ugięć standaryzowanych przedstawione w Tab. 2. **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** **Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.** i na Rys. 10.

Tab. 2. Progowe wartości ugięcia standaryzowanego, μm , dla układu lat $N=2, 8, 18$ i prawdopodobieństwa $p = 0.2$.

| Kategoria ruchu (liczba osi 100 kN/dobę) | | Granice klas nośności (lata) | | |
|---|------|------------------------------|-----|-----|
| | | A/B | B/C | C/D |
| | | 18 | 8 | 2 |
| KR1-2 | 70 | 224 | 307 | 526 |
| KR3 | 335 | 122 | 167 | 287 |
| KR4 | 1000 | 80 | 109 | 187 |
| KR5 | 2000 | 61 | 84 | 143 |
| KR6 | 3000 | 52 | 71 | 122 |



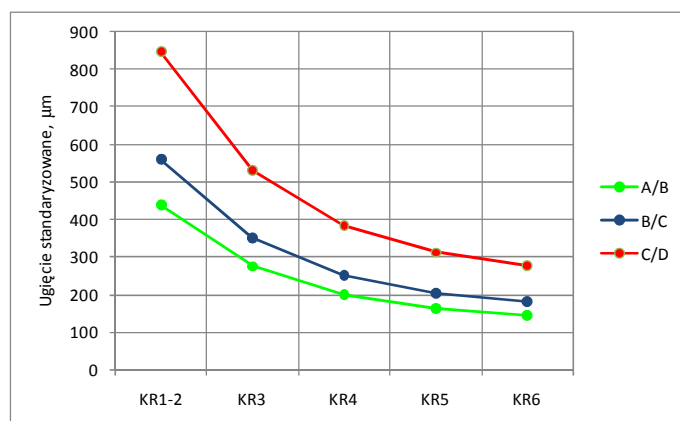
Rys. 10. Skala klasyfikacji nośności.

Podobnie postępując z zależnościami (20), (22), (24), (26) wyznaczonymi dla nawierzchni różnych typów, obliczono rodzinę progowych wartości ugięć standaryzowanych, przedstawioną w Tab. 3 do Tab. 6 i odpowiednio na Rys. 11 do Rys. 14.



Tab. 3. Progi klas nośności dla konstrukcji typu 1 (por. pkt 3).

| Kategoria ruchu (liczba osi 100 kN/dobę) | | Granice klas nośności (lata) | | |
|---|------|------------------------------|-----|-----|
| | | A/B | B/C | C/D |
| | | 18 | 8 | 2 |
| KR1-2 | 70 | 439 | 560 | 848 |
| KR3 | 335 | 275 | 350 | 531 |
| KR4 | 1000 | 198 | 253 | 383 |
| KR5 | 2000 | 161 | 205 | 311 |
| KR6 | 3000 | 143 | 182 | 275 |



Rys. 11. Skala klasyfikacji nośności dla konstrukcji typu 1 (por. pkt 3).

Tab. 4. Progi klas nośności dla konstrukcji typu 2 (por. pkt 3).

| Kategoria ruchu (liczba osi 100 kN/dobę) | | Granice klas nośności (lata) | | |
|---|------|------------------------------|------|------|
| | | A/B | B/C | C/D |
| | | 18 | 8 | 2 |
| KR1-2 | 70 | 683 | 1061 | 2254 |
| KR3 | 335 | 292 | 454 | 963 |
| KR4 | 1000 | 161 | 250 | 532 |
| KR5 | 2000 | 111 | 172 | 365 |
| KR6 | 3000 | 89 | 138 | 293 |

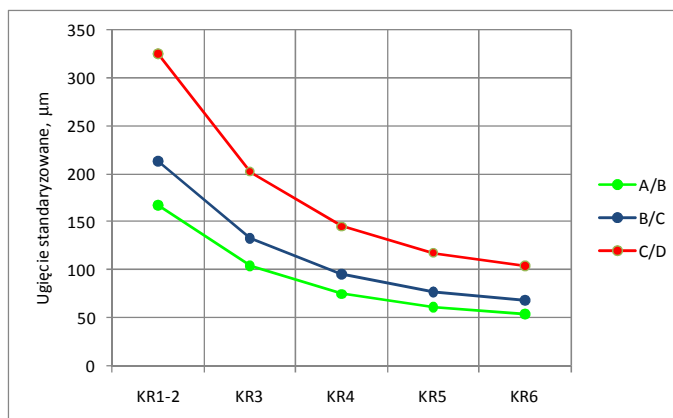


Rys. 12. Skala klasyfikacji nośności dla konstrukcji typu 2 (por. pkt 3).



Tab. 5. Progi klas nośności dla konstrukcji typu 3 (por. pkt 3).

| Kategoria ruchu (liczba osi 100 kN/dobę) | | Granice klas nośności (lata) | | |
|---|------|------------------------------|-----|-----|
| | | A/B | B/C | C/D |
| | | 18 | 8 | 2 |
| KR1-2 | 70 | 167 | 214 | 325 |
| KR3 | 335 | 104 | 133 | 203 |
| KR4 | 1000 | 75 | 96 | 146 |
| KR5 | 2000 | 61 | 78 | 118 |
| KR6 | 3000 | 54 | 69 | 104 |



Rys. 13. Skala klasyfikacji nośności dla konstrukcji typu 3 (por. pkt 3).

Tab. 6. Progi klas nośności dla konstrukcji typu 4 (por. pkt 3).

| Kategoria ruchu (liczba osi 100 kN/dobę) | | Granice klas nośności (lata) | | |
|---|------|------------------------------|-----|-----|
| | | A/B | B/C | C/D |
| | | 18 | 8 | 2 |
| KR1-2 | 70 | 202 | 262 | 408 |
| KR3 | 335 | 122 | 159 | 247 |
| KR4 | 1000 | 86 | 112 | 174 |
| KR5 | 2000 | 69 | 90 | 140 |
| KR6 | 3000 | 61 | 79 | 123 |



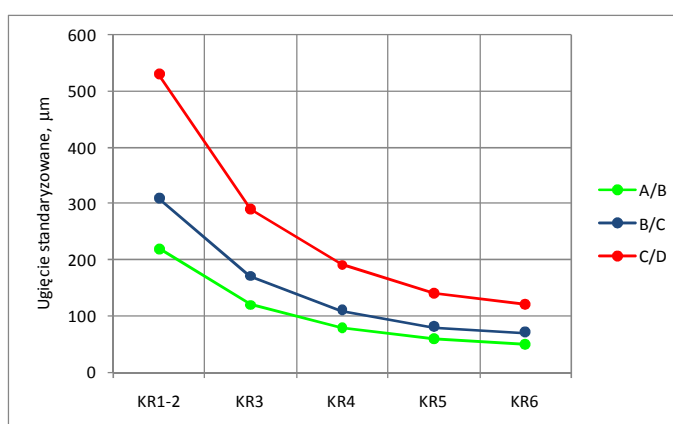
Rys. 14. Skala klasyfikacji nośności dla konstrukcji typu 4 (por. pkt 3).



Zważywszy na przybliżenia poczynione przy obliczaniu pozostałej trwałości, nie ma sensu aby progi klasyfikacyjne były podawane z dokładnością do 1 μm a zatem powyższe liczby powinny zostać zaokrąglone do dziesiątek. Propozycję klasyfikacji nośności dla nawierzchni bez rozróżnienia ich konstrukcji przedstawiono w Tab. 7 i na Rys. 15.

Tab. 7. Propozycja progów klas nośności przy rozróżnieniu dróg o różnym obciążeniu ruchem. Ugięcie standaryzowane, μm .

| Kat. ruchu | A/B | B/C | C/D |
|------------|-----|-----|-----|
| KR1-2 | 220 | 310 | 530 |
| KR3 | 120 | 170 | 290 |
| KR4 | 80 | 110 | 190 |
| KR5 | 60 | 80 | 140 |
| KR6 | 50 | 70 | 120 |

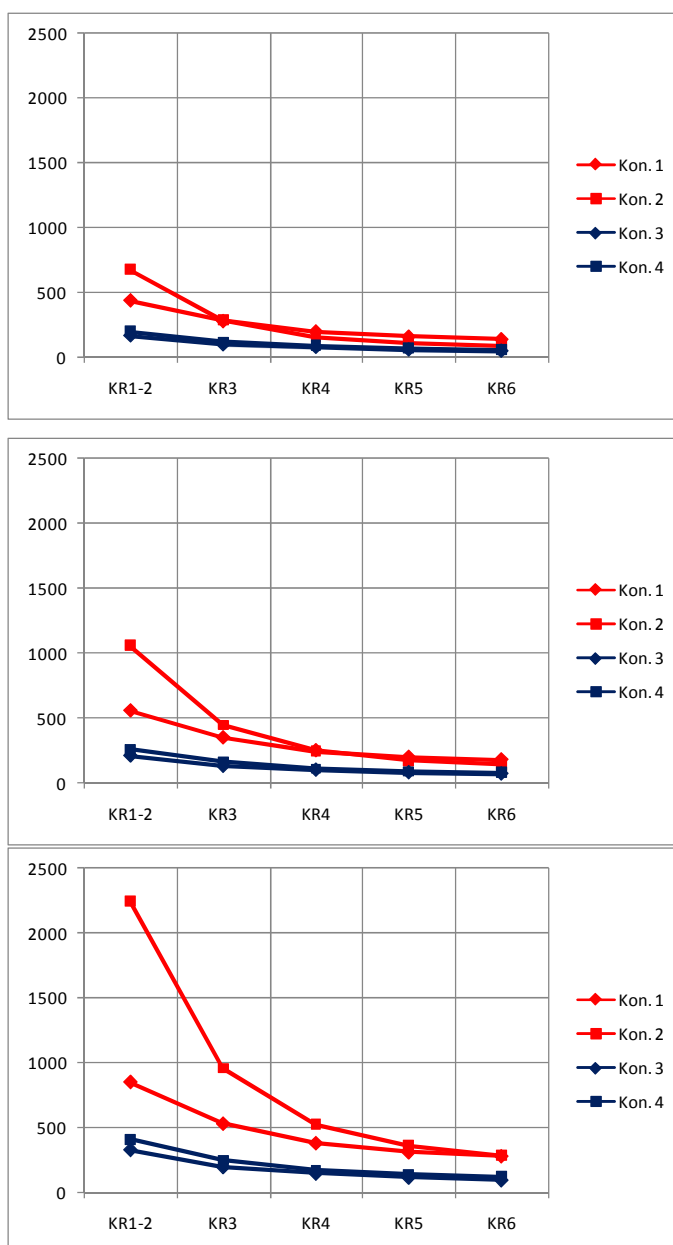


Rys. 15. Propozycja wartości progowych przy założeniu: $p=20\%$, $N=18, 8, 2$ lata.

W przypadku gdy rozpoznany jest typ konstrukcji nawierzchni do oceny nośności proponuje się klasyfikację podaną w Tab. 8 i na Rys. 16.

Tab. 8. Propozycja progów klas nośności przy rozróżnieniu dróg o różnym obciążeniu ruchem i różnych typach konstrukcji (por. pkt 3). Ugięcie standaryzowane, μm .

| Kat. ruchu | A/B | | | | B/C | | | | C/D | | | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Kon. 1 | Kon. 2 | Kon. 3 | Kon. 4 | Kon. 1 | Kon. 2 | Kon. 3 | Kon. 4 | Kon. 1 | Kon. 2 | Kon. 3 | Kon. 4 |
| KR1-2 | 440 | 680 | 170 | 200 | 560 | 1060 | 210 | 260 | 850 | 2250 | 330 | 410 |
| KR3 | 280 | 290 | 100 | 120 | 350 | 450 | 130 | 160 | 530 | 960 | 200 | 250 |
| KR4 | 200 | 160 | 80 | 90 | 250 | 250 | 100 | 110 | 380 | 530 | 150 | 170 |
| KR5 | 160 | 110 | 60 | 70 | 200 | 170 | 80 | 90 | 310 | 370 | 120 | 140 |
| KR6 | 140 | 90 | 50 | 60 | 180 | 140 | 70 | 80 | 280 | 290 | 100 | 120 |



Rys. 16. Propozycja wartości progowych przy założeniu: $p=20\%$, kolejno dla progów A/B (18 lat), B/C (8 lat), C/D (2 lata).

4.4. Agregacja danych

Ocena nośności na potrzeby stosowanego w GDDKiA Systemu Diagnostyki Sieci Drogowej, powinna być wykonywana dla stumetrowych odcinków drogi. Ponieważ pomiary mogą być wykonywane w różnych odstępach, mniejszych lub większych niż 100 m a nawet z zaburzoną regularnością.

Ponieważ funkcja wiążąca wielkość ugięcia z pozostałą trwałością jest nieliniowa, nie jest obojętna kolejność działań: najpierw powinna być wyznaczona pozostała trwałość w poszczególnych punktach pomiaru a następnie obliczona miarodajna wartość dla odcinków stumetrowych i pomiarowych (zasadniczo 1000 m ale dopuszczane są długości w zakresie 500 – 1500 m), [17].



Ponieważ, pozostała trwałość w swojej metodyce obliczania zawiera już element bezpieczeństwa, jaki zawiera w sobie idea wartości miarodajnej, to wartości miarodajne są obliczane jako średnie:

$$(27) \quad RL_m = \frac{\sum_{i=1}^n RL_i}{n}$$

$$(28) \quad RL_p = \frac{\sum_{i=1}^k RL_{mi}}{k}$$

gdzie:

- RL_m - miarodajna wartość pozostałej trwałości na odcinku 100 m,
- n - liczba pomiarów ugięcia (wartości pozostałej trwałości RL) na danym odcinku 100 m,
- RL_p - miarodajna wartość pozostałej trwałości na odcinku pomiarowym,
- RL_{mi} - miarodajna wartość pozostałej trwałości na i -tym odcinku stumetrowym
- k - liczba miarodajnych pozostałych trwałości RL_m na odcinku pomiarowym.

Jeżeli czy to na skutek długiego kroku pomiarowego czy nieregularności w pomiarach, na danym odcinku stumetrowym nie jest dostępna wartość ugięcia nawierzchni, wówczas odcinkowi nie przypisuje się żadnej trwałości. Nie jest wykonywana żadna interpolacja lub ekstrapolacja.

Ogólna ocena nośności drogi wykonywana jest analogicznie, brany jest pod uwagę jedynie fakt, że na wartość poszczególnych ocen odcinków pomiarowych może składać się różna liczba wartości miarodajnych dla odcinków 100 m.

$$(29) \quad RL_D = \frac{\sum_{i=1}^q n_i \cdot RL_{pi}}{\sum_{i=1}^q n_i}$$

gdzie:

- RL_D - miarodajna wartość pozostałej trwałości na odcinku drogi,
- RL_{pi} - miarodajna wartość pozostałej trwałości na i -tym odcinku pomiarowym,
- n_i - liczba wartości pozostałej trwałości RL_m na i -tym odcinku pomiarowym.

5. Ocena nośności dla potrzeb ewidencji dróg

Rozporządzenie w sprawie sposobu numeracji i ewidencji dróg publicznych [2] wymaga podania nośności drogi jako dopuszczalnego nacisku osi na nawierzchnię. W ewidencji drogi chodzi o nominalną nośność nawierzchni, tym niemniej w podobny sposób można określić nośność faktyczną.

Zadanie formułujemy następująco: przy jakim nacisku P nawierzchnia w ciągu 20 lat przeniesie N_{100} osi obliczeniowych jeśli przy nacisku 100 kN na oś trwałość nawierzchni wynosi R_{RL} . Odpowiadając na to pytanie należy posłużyć się prawem czwartej potęgi [7] oraz równaniem (15) (w ogólnym przypadku (13)):

$$(30) \quad \frac{R_{RL}}{N_{100}} = \left(\frac{P}{100}\right)^4$$

$$(31) \quad P = 100 \cdot \left(\frac{f(d_0)}{N_{100}}\right)^{1/4} = 100 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot d_0^b}{20 \cdot SDR_{100} \cdot 365}\right)^{1/4}$$

gdzie SDR_{100} jest średnim dobowym ruchem w osiach obliczeniowych 100 kN/pas.

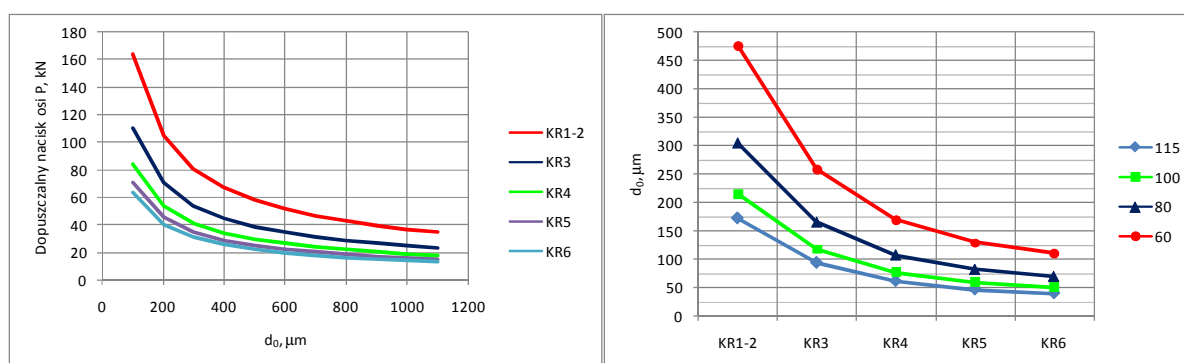


Wyznaczenie dopuszczalnej tej wielkości powinno być wykonywane według następującej procedury:

1. Obliczenie modułów sprężystości warstw konstrukcyjnych nawierzchni na podstawie zmierzonych ugięć nawierzchni (tzw. obliczenia odwrotne, pkt 2.1.1).
2. Wielowariantowe obliczenia pól naprężeń i odkształceń w nawierzchni o parametrach wyznaczonych w kroku 1 pod wpływem różnej wielkości obciążeń.
3. Obliczenie dopuszczalnej liczby standardowych obciążeń przy wykorzystaniu funkcji zmęzeniowych z użyciem wartości wyznaczonych w krokach 1 i 2.
4. Ustalenie wielkości dopuszczalnego obciążenia, przy którym całkowity ruch na drodze w okresie 20 lat (wymagana przepisami [4] trwałość nawierzchni bitumicznych), przeliczony na naciski standardowe, nie przekroczy wyznaczonej w kroku 3 liczby.

Wykres na Rys. 17 podaje zależność:

- między naciskiem osi na nawierzchnię a ugięciem standaryzowanym nawierzchni przy różnych wielkościach obciążenia ruchem oraz
- wielkością ugięcia a kategorią ruchu dla różnych dopuszczalnych nacisków osi.

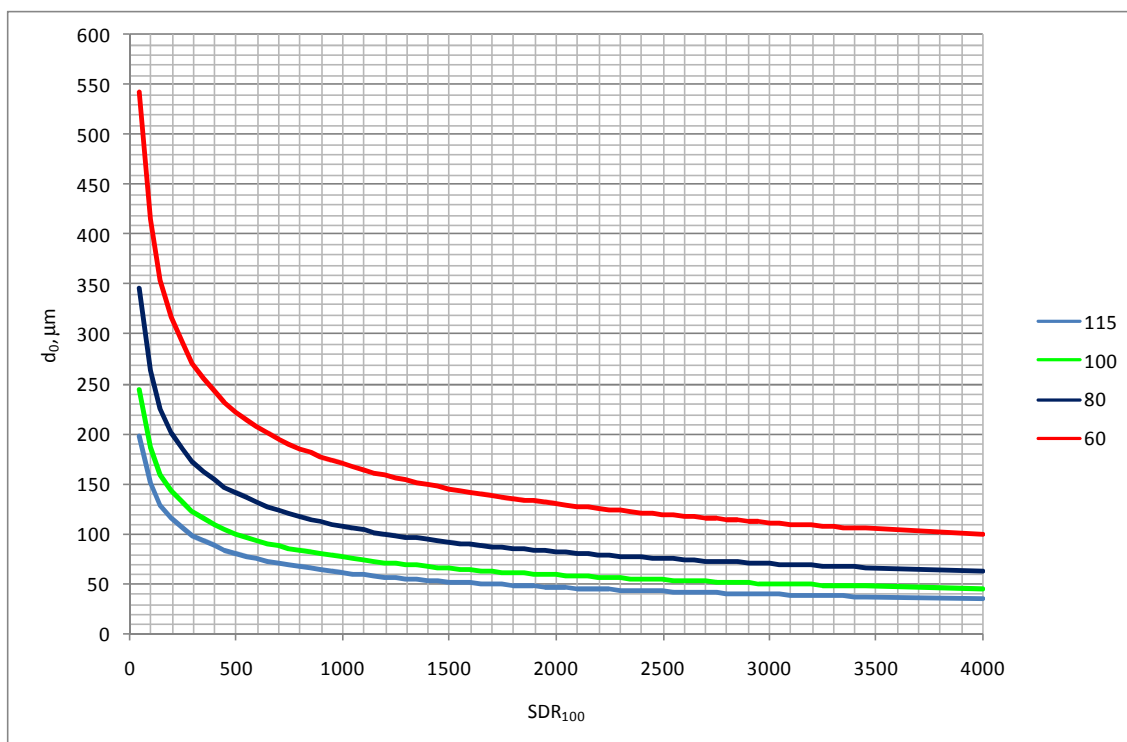


Rys. 17. Zależność dopuszczalnego nacisku osi, standaryzowanego ugięcia nawierzchni i natężenia ruchu.

Klasyfikację nośności wyrażoną poprzez dopuszczalne naciski, opartą na powyższej zależności zamieszczono w Tab. 9 i na Rys. 18.

Tab. 9. Klasyfikacja nośności poprzez dopuszczalne naciski w zależności od kategorii ruchu. Ugięcie standaryzowane, μm .

| Kategoria ruchu | | Dopuszczalny nacisk, kN | | | | |
|-----------------|------|-------------------------|---------|---------|---------|------|
| | | >115 | 100-115 | 80-100 | 60-80 | <60 |
| KR1-2 | 70 | <170 | 170-220 | 220-300 | 476 | >476 |
| KR3 | 335 | <90 | 90-120 | 120-170 | 170-260 | >260 |
| KR4 | 1000 | <60 | 60-80 | 80-110 | 110-170 | >170 |
| KR5 | 2000 | <50 | 50-60 | 60-80 | 80-130 | >130 |
| KR6 | 3000 | <40 | 40-50 | 50-70 | 70-110 | >110 |



Rys. 18. Rodzina krzywych umożliwiającą oszacowanie dopuszczalnego nacisku przy dowolnym ugięciu standaryzowanym i natężeniu ruchu.

6. Wnioski

Przeprowadzona analiza dowodzi, że nośność nawierzchni można ocenić prostymi metodami, korzystając jedynie z wyniku pomiaru ugięcia pod obciążeniem dynamicznym. Do tego celu najbardziej nadaje się najprostszy z parametrów charakteryzujących czasę ugięcia: ugięcie maksymalne sprowadzone do standardowych warunków nacisku 50 kN na kołowej powierzchni o średnicy 0.3 m przy temperaturze warstw bitumicznych 20 °C. Należy podkreślić, że przedstawiona metoda powinna być stosowana do sieciowej oceny nośności ponieważ oparta jest na statystycznie opracowanych zależnościach. Nie można zatem zaproponowanej klasyfikacji stosować dla celów projektowych.

Uzyskane rezultaty pozwalają także oceniać nośność nawierzchni w duchu rozporządzenia o numeracji i ewidencji dróg [2], przez podanie dopuszczalnego nacisku osi na danej drodze.

W porównaniu do wstępnego badania przeprowadzonego na niewielkiej próbie danych z programu DOT [18], należy stwierdzić znaczne zmniejszenie ugięć odpowiadającym granicom klasyfikacji oraz zwiększenie rozpiętości między nimi.

Bibliografia

- [1] System Oceny Stanu Nawierzchni „SOSN”. Wytyczne stosowania, Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1989.
- [2] Zarządzenie Nr 11 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 10 czerwca 2008 r. w sprawie wprowadzenia „Komentarz do rozporządzenia w sprawie numeracji i ewidencji dróg oraz obiektów mostowych w zakresie drogowym”.



- [3] Judycki J., Porównanie kryteriów zmęzeniowych do projektowania podatnych i półsztywnych nawierzchni drogowych w aspekcie nowego polskiego katalogu typowych konstrukcji. Część 1, Drogownictwo 1(1999)19.
- [4] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich użytkowanie. Dz. U. Nr 43, poz. 430.
- [5] Thickness Design – Asphalt Pavements for Highways and Streets, The asphalt Institute, MS-1,1981.
- [6] Dempsey B. J. et al.: Report ESL-TR-83-34, University of Illinois, Urbana, 1984.
- [7] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, GDDP, Warszawa, 1997.
- [8] Baltzer S., Hildebrand G., HSD Measurements at the BAST Test Track, Danish Road Institute Technical Note 63, 2007.
- [9] Eijbersen M. J., van Zwieten J., Application of FWD-measurements at the network level, Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, May 1998.
- [10] Paine D., The incorporation of structural data in a pavement management system, Fourth International Conference on Managing Pavements, Durban, May 1998.
- [11] Falling Weight Deflectometer, COST – Transport Publications 336, 1997.
- [12] The Highway Design and Maintenance Standards Models, T. Watanada et al., A World Bank Publication, 1987, vol. 1.
- [13] Zhang Z., Claros G., Manuel L. Damnjanovic I., Evaluation of the pavement structural condition at network level using Falling Weight Deflectometer (FWD) data, 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2003.
- [14] Gutierrez-Bolivar O., Achutegui F., Fatigue cracking and deflection, Fifth International Conference on Managing Pavements, Seattle, August 2001.
- [15] Molenaar A. A. A., Structural Design of Pavements. Part VI Structural Evaluation and Strengthening of Flexible Pavements Using Deflection Measurements and Visual Condition Surveys. TU Delft Lectures, 2006.
- [16] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich użytkowanie, Dz. U. 43, poz. 430, 14.05.1999.
- [17] Zarządzenie Nr 9 Generalnego Dyrektora Dróg Publicznych z dnia 4 marca 2002 roku. Załącznik System Oceny Stanu Nawierzchni SOSN. Wytyczne stosowania. Warszawa, 2002.
- [18] Janowski A., Wykonanie XVI serii badań na Długoterminowych Odcinkach Testowych (DOT) wraz z pomiarami ugięć dynamicznych przy użyciu aparatu FWD na DOT. Supplement. Raport DRO-KONSULT dla GDDKiA, 2007.