



STEFAN FIRLEJ

Politechnika Lubelska  
s.firlej@pollub.pl



AGNIESZKA WOSZUK

Politechnika Lubelska  
a.wozuk@pollub.pl

## Metoda uwzględniania wartości ugięć poza zakresem nomogramu przy projektowaniu wzmocnienia konstrukcji nawierzchni

Ocena stanu nośności nawierzchni jest możliwa na podstawie nieniszczących badań pionowych przemieszczeń konstrukcji pod obciążeniem pojazdu ciężarowego. W przypadku braku wymaganej nośności, bardzo często projektowane jest wzmocnienie istniejącej konstrukcji nakładką. Aby określić rodzaj i grubość poszczególnych warstw wzmocnienia można korzystać z nomogramu lub prowadzić obliczenia metodami mechanistycznymi [1]. Wybór

odpowiedniego sposobu projektowania zależy od konstrukcji nawierzchni oraz od kategorii ruchu. Do projektowania wzmocnień istniejących nawierzchni obciążonych ruchem kategorii KR1-KR4 dopuszczalna jest metoda ugięć. Metoda ta zakłada, że trwałość nawierzchni asfaltowej jest zależna od maksymalnego ugięcia sprężystego nawierzchni, występującego w punkcie obciążenia konstrukcji. Im większe ugięcie nawierzchni, tym niższa jest jej trwałość. Wzmocnienie, wyrażone grubością warstwy tłucznia, ustalane jest na podstawie nomogramu (rys. 2). Określenie grubości poszczególnych warstw dokonuje się przez zastosowanie odpowiednich współczynników materiałowych. Nie zawsze ugięcie obliczeniowe do danego ruchu obliczeniowego daje wprost odpowiedź z nomogramu (rys. 2) na temat wymaganej grubości wzmocnienia. Artykuł przedstawia metodykę postępowania w takich przypadkach.

### Ugięcia nawierzchni drogowych

Istnieje kilka metod pomiarów ugięć, wykorzystujących różne urządzenia badawcze:

- pomiar od obciążeń statycznych – belka Benkelmana,
- pomiar od obciążeń dynamicznych – *FWD*,
- pomiar quasi-dynamicznych – belka zautomatyzowana Lacroix,
- pomiar przy rzeczywistym obciążeniu kołem jadącego pojazdu – *RWD*.

W Polsce, na drogach obciążonych ruchem kategorii KR1-KR4, stosuje się pomiar ugięć sprężystych od obciążeń statycznych, belką Benkelmana. W badaniu ugięciomierzem belkowym wynik to maksymalne ugięcie sprężyste w centrum obciążenia. Ugięciomierz *FWD* rejestruje natomiast przemieszczenia pionowe od obciążeń dynamicznych. Wartości ugięć mierzone są pod wpływem zadanego obciążenia, za pomocą

zestawu czujników umieszczonych w centrum obciążenia oraz w kilku ustalonych od punktu obciążenia odległościach. Dzięki temu wynik badania daje pełny obraz krzywizny ugięcia wywołanej przez zadane obciążenia i jest podstawą do projektowania wzmocnienia metodą mechanistyczną.

Maksymalne przemieszczenia pionowe otrzymane różnymi technikami pomiarowymi nie są równoważne. Możliwe jest jednak stosowanie wyników badań ugięciomierzem *FWD* zamiennie do pomiarów belką Benkelmana. Należy odpowiednio przeliczyć, wg zależności (1) lub (2), ugięcie miarodajne na nawierzchni [1]:

- podatnej:  $BB = 1,24 FWD$  (1)
- półsztywnej:  $BB = 1,31 FWD$  (2)

w których:

*BB* – ugięcie sprężyste zmierzone belką Benkelmana, mm,  
*FWD* – ugięcie sprężyste zmierzone ugięciomierzem *FWD* pod środkiem płyty, mm.

Na wartość przemieszczenia pionowego ma wpływ wiele czynników lokalnych, takich jak: pora roku, temperatura warstw asfaltowych, czy rodzaj podbudowy. W przypadku projektowania wzmocnienia nawierzchni metodą ugięć sprężystych, otrzymane z badań wyniki poddawane są analizie statystycznej, efektem czego jest miarodajne ugięcie sprężyste. Stosując współczynniki przeliczeniowe należy skorygować, wg zależności (3), wpływ wyżej wymienionych czynników:

$$U_{obl} = U_m \cdot f_T \cdot f_S \cdot f_P \quad (3)$$

w której:

$U_{obl}$  – ugięcie sprężyste obliczeniowe,

$U_m$  – miarodajne ugięcie sprężyste,

$f_T$  – współczynnik temperaturowy (korygujący ugięcia ze względu na temperaturę pomiaru ugięć  $T$  (°C)),

$f_S$  – współczynnik sezonowości (korygujący ugięcia ze względu na porę roku),

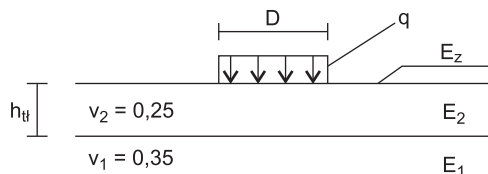
$f_P$  – współczynnik podbudowy (korygujący ze względu na rodzaj podbudowy).

Uzyskana w ten sposób wielkość ugięcia sprężystego obliczeniowego oraz prognozowany ruch są podstawą do wyznaczenia grubości nakładki wzmocniającej.

### Model nawierzchni możliwy do zastosowania w metodzie ugięć

Nawierzchnię drogi, w metodach wymiarowania, przedstawić można jako model wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej, obciążony naciskiem równomiernie rozłożonym na powierzchni kołowej [5]. Model wielowarstwowy zamienić

można na model półprzestrzeni sprężystej [6]. Zastępczy moduł sprężystości nawierzchni wielowarstwowej będzie wtedy równy modułowi półprzestrzeni sprężystej, której ugięcie maksymalne jest równe maksymalnemu ugięciu nawierzchni wielowarstwowej, obciążonej w taki sam sposób [4]. W omawianym przypadku konstrukcja jezdni przedstawiona jest jako dwuwarstwowy model nawierzchni (rys.1). Górną warstwę określają parametry:  $h$  – grubość,  $E$  – moduł sprężystości,  $\nu$  – współczynnik Poissona. Dolną warstwę o nieograniczonej grubości określono tylko modułem sprężystości i współczynnikiem Poissona. Moduł sprężystości tłucznia (warstwa górna) przyjęto równą  $E = 400$  MPa. W rozważanym modelu badanej nawierzchni warstwa dolna to konstrukcja istniejącej nawierzchni. Współczynnik Poissona tej konstrukcji przyjęto równy współczynnikowi podłoża gruntowego,  $\nu_1 = 0,35$  (rys 1).



Rys. 1. Model nawierzchni 2-warstwowej [3]

Moduł zastępczy  $E_z$  lub grubość warstwy tłucznia określić można na podstawie nomogramu (rys. 3) lub (rys. 4). Zależność pomiędzy ugięciem obliczeniowym a odpowiadającym mu modułem sprężystości opisuje wzór (4):

$$E = \frac{q \times D \times (1 - \nu_z^2)}{u} \quad u = \frac{q \times D \times (1 - \nu_z^2)}{E} \quad (4)$$

w którym:

$D$  – nacisk tylnej osi samochodu ciężarowego podczas badania ugięcia [kN],

$q$  – nacisk jednostkowy śladu koła bliźniaczego samochodu [kPa],

$\nu_z$  – współczynnik Poissona modelu zastępczego, równy wartości współczynnika podłoża gruntowego,

$u$  – ugięcie obliczeniowe odczytane z granicznej krzywej na nomogramie.

Średnicę śladu koła bliźniaczego obliczyć można ze wzoru:

$$D = \sqrt{\frac{2 \times P}{\Pi \times q}} \quad (5)$$

Zgodnie z parametrami oddziaływania kół bliźniaczych:

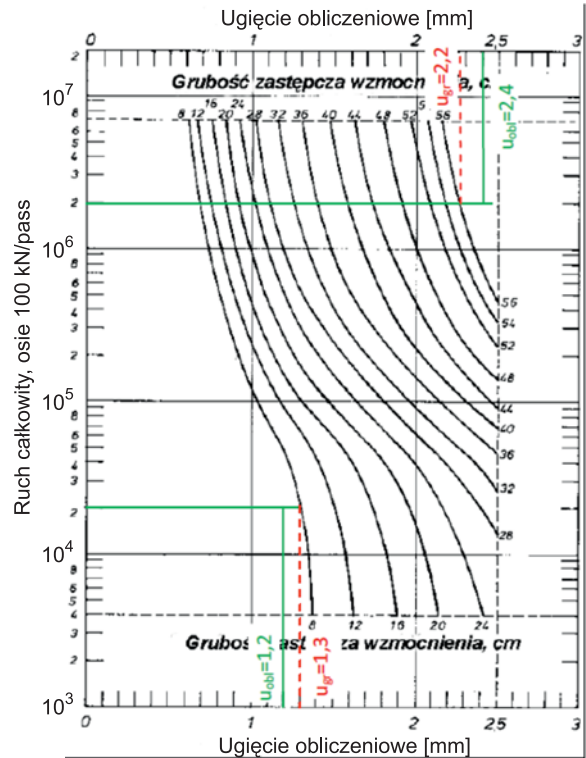
Nacisk jednostkowy pod kołem:  $q = 650$  kPa.

$$\text{Średnica śladu koła} : D = \sqrt{\frac{2 \times P}{\Pi \times q}} = \sqrt{\frac{2 \times 100}{3,14 \times 650}} = 0,313m$$

## Metoda postępowania w przypadkach trudności wyznaczania wzmocnienia na podstawie nomogramu

Nomogram (rys. 2) stosowany w metodzie ugięć nie umożliwia określenia grubości wzmocnienia w trzech przypadkach, gdy:

- 1) grubość zastępcza nakładki (tłucznia), wyznaczona przez dolną graniczną krzywą na nomogramie, jest mniejsza niż 8 cm,
- 2) grubość zastępcza nakładki (tłucznia), wyznaczone przez górną graniczną krzywą na nomogramie, jest większa niż 56 cm przy obciążeniu ruchem kategorii KR3-KR4,
- 3) ugięcie obliczeniowe jest większe od 2,5 mm, przy obciążeniu ruchem kategorii KR1-KR2.



Rys 2. Nomogram do wyznaczania wymaganej grubości zastępczej wzmocnienia [1]

W omawianej metodzie obliczenia przeprowadza się dwuetapowo. W pierwszej kolejności należy określić moduł zastępczy, przy którym wzmocnienie nie będzie potrzebne. W drugim etapie należy obliczyć przy jakiej grubości wzmocnienia osiągnięty zostanie „moduł zerowego wzmocnienia”.

## Kolejność postępowania przy wyznaczaniu wzmocnienia

1. Do znanego obciążenia obliczeniowego  $N_{100kN/pas}$  odczytujemy (rys. 2) ugięcie z najbliższej (w stosunku do znanego nam ugięcia obliczeniowego) krzywej.

2. Do odczytanego z nomogramu (rys. 2) ugięcia obliczamy moduł zastępczy podłoża  $E_1$  według wzoru (4).

3. Określamy zastępczy moduł sprężystości następującymi ilorazami:  $\frac{E_1}{E_2}, \frac{h}{D}$ ,

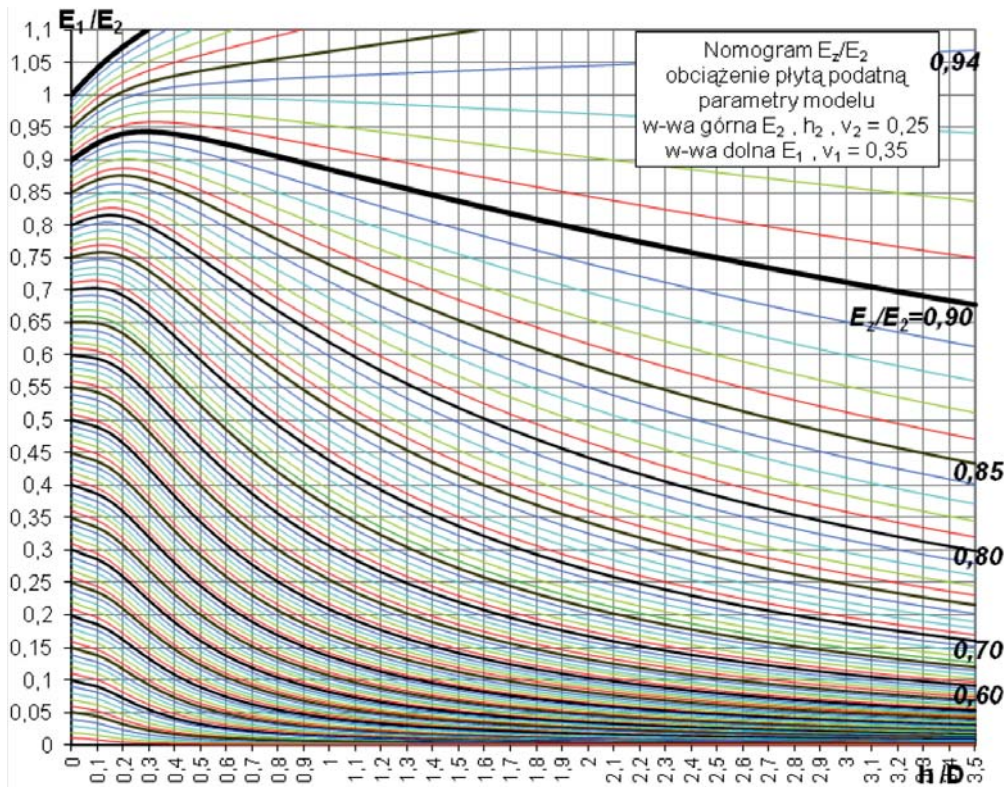
w których:

$E_1$  – moduł podłoża (pkt. 2, jak wyżej),

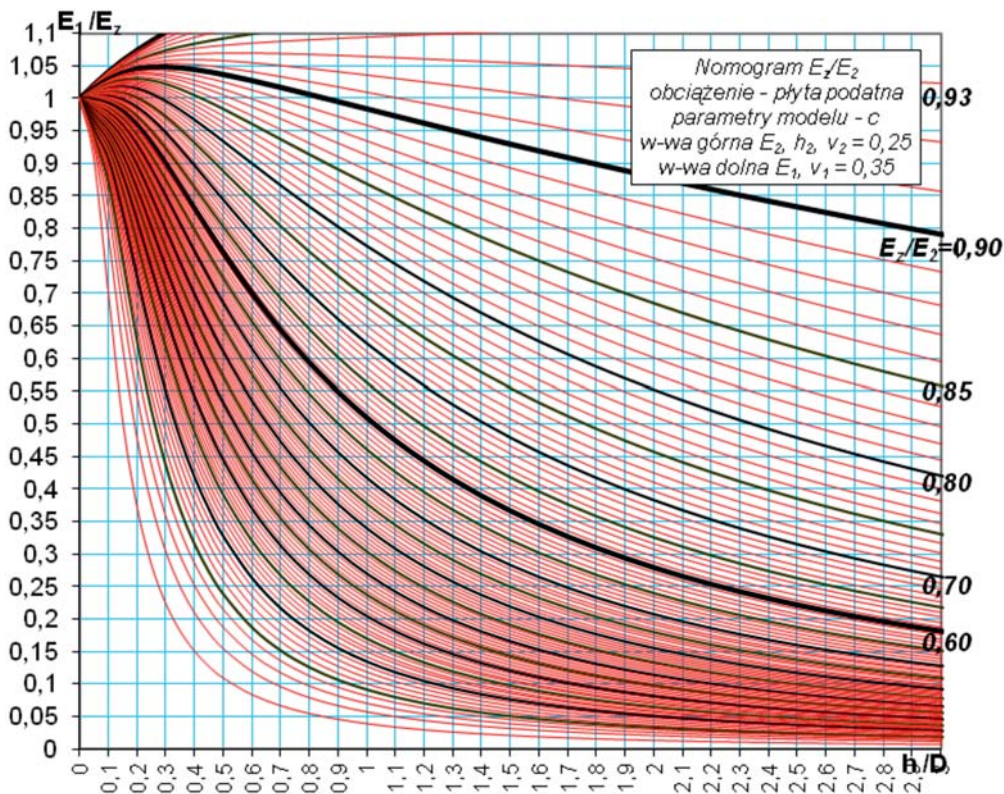
$h$  – grubość warstwy tłucznia (z nomogramu rys. 2, pkt. 1, jak wyżej)

$E_2 = 400$  MPa (dla tłucznia),

a następnie z nomogramu (rys. 3) odczytujemy iloraz  $\frac{E_z}{E_2}$  aby stąd otrzymać  $E_z$ .



Rys. 3. Nomogram do wyznaczania modułu w modelu dwuwarstwowym [3]



Rys. 4. Nomogram do wyznaczenia modułu warstwy dolnej [3]

4. Do modelu dwuwarstwowego, z ugięcia obliczeniowego znanego z badań, obliczamy  $E_1$  i rozwiązujemy model, w którym będą dane:  $E_2 = 400$  MPa,  $E_z$  (otrzymane w punkcie 3). Otrzymujemy iloraz:  $\frac{E_z}{E_2}; \frac{E_1}{E_2}$  i do tych wartości odczytujemy z nomogramu (rys. 3)  $\frac{h}{D}$ , aby otrzymać poszukiwaną grubość warstwy tłucznia –  $h$  do tego ugięcia i obciążenia drogi.

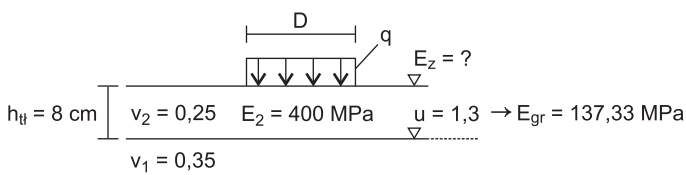
#### Przykład obliczeniowy 1

Wyznaczyć wzmocnienie nawierzchni do ugięcia obliczeniowego  $u_{obl} = 1,2$  mm przy ruchu obliczeniowym 12 000  $N_{100kN/pas}$  w okresie 20 lat.

Na podstawie ruchu obliczeniowego wyznaczono kategorię ruchu KR2. Do tej kategorii można projektować wzmocnienie nawierzchni metodą ugięć [1].

a) Wyznaczenie danych do granicznej krzywej nomogramu wzmocnienia:

- przy  $h = 8$  cm i ruchu obliczeniowego 12 tys.  $N_{100\text{kN/pas}}$  mamy ugięcie  $u = 1,3$  mm (odczyt rys. 2), odpowiedni temu model jest następujący (rys. 4):



Rys. 4. Model nawierzchni do krzywej granicznej nomogramu w przykładzie 1

- ze wzoru (4) wyznaczamy moduł:

$$E_{gr} = \frac{q \times D \times (1 - v_z^2)}{u} = \frac{0,65 \times 0,313 \times (1 - 0,35^2)}{1,3 \times 10^{-2}} = 137,33 \text{ MPa}$$

- moduł zastępczy po wzmocnieniu tłuczniem  $h = 8$  cm będzie równy:  $\frac{h}{D} = \frac{8}{31,3} = 0,2556$   $\frac{E_{gr}}{E_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{137,33}{400} = 0,3433$ ,

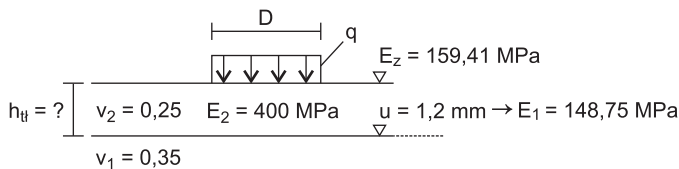
$$\frac{h}{D} = \frac{8}{31,3} = 0,2556 \quad \frac{E_{gr}}{E_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{137,33}{400} = 0,3433,$$

więc na podstawie (rys. 3)

$$\frac{E_z}{E_2} = 0,3985, \text{ a stąd: } E_z = 0,3985 \times 400 = 159,41 \text{ MPa}$$

- b) Wyznaczenie wzmocnienia do wielkości ugięcia  $u_{obl} = 1,2$  mm.

Schemat modelu:



Rys. 5. Model do wyznaczenia wzmocnienia poza krzywą graniczną w przykładzie 1

- moduł sprężystości istniejącej konstrukcji w oparciu o wzór (3):

$$E_1 = \frac{q \times D \times (1 - v_z^2)}{u_{obl}} = \frac{0,65 \times 0,313 \times (1 - 0,35^2)}{1,2 \times 10^{-2}} = 148,75 \text{ MPa}$$

na podstawie ilorazu:

$$\frac{E_{1vz}}{E_2} = \frac{148,75}{400} = 0,3719, \quad \frac{E_z}{E_2} = \frac{159,41}{400} = 0,3985, \text{ z rys. 3 otrzym}$$

mano  $\frac{h_{tl}}{D} = 0,1534$ , a po wstawieniu:  $D = 31,3$  cm otrzyma-

no:  $h_{tl} = 0,1534 \times 31,3 = 4,8$  cm.

Potrzebna grubość wzmocnienia tłuczniem wynosi 4,8 cm, czyli o 3,2 cm mniej niż wynikałoby z granicznej krzywej do tego obciążenia.

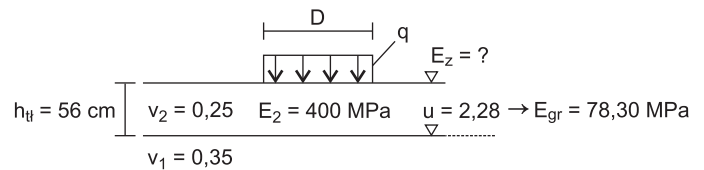
## Przykład obliczeniowy 2

Wyznaczyć wzmocnienie nawierzchni do ugięcia obliczeniowego  $u_{obl} = 2,4$  mm przy ruchu obliczeniowym 2 000 000  $N_{100\text{kN/pas}}$  w okresie 20 lat.

Na podstawie ruchu obliczeniowego wyznaczono kategorię ruchu KR3. Przy tej kategorii można projektować wzmocnienie nawierzchni metodą ugięć [1].

- a) Wyznaczenie danych do granicznej krzywej nomogramu wzmocnienia:

- przy ruchu obliczeniowym 2 mln  $N_{100\text{kN/pas}}$  graniczna krzywa (rys. 2) to 56 cm, a ugięcie odczytane wynosi  $u = 2,8$  mm (odczyt z rys. 2). Odpowiedni temu model jest następujący (rys. 6):



Rys. 6. Model nawierzchni do krzywej granicznej nomogramu w przykładzie 2

- ugięciu  $u = 2,28$  mm odpowiada moduł:

$$E_{gr} = \frac{q \times D \times (1 - v_z^2)}{u} = \frac{0,65 \times 0,313 \times (1 - 0,35^2)}{2,28 \times 10^{-3}} = 78,30 \text{ MPa.}$$

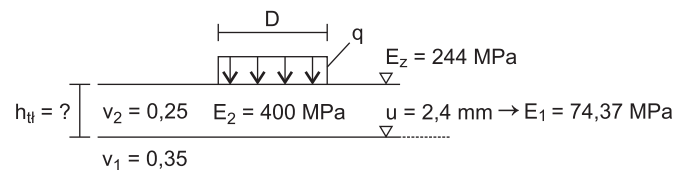
- moduł zastępczy do zerowego wzmocnienia przy tej krzywej granicznej:

$$\frac{h}{d} = \frac{56}{31,3} = 1,79 \quad \frac{E_{gr}}{E_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{78,30}{400} = 0,1958$$

stąd:  $\frac{E_z}{E_2} = 0,61$  (rys. 3), a następnie  $E_z = 0,61 \times 400 = 244$  MPa

- b) Wyznaczenie wzmocnienia do ugięcia  $u_{obl} = 2,4$  mm.

Schemat modelu przedstawiony jest na rys. 7.



Rys. 7. Model do wyznaczenia wzmocnienia poza krzywą graniczną do przykładu 2

- moduł sprężystości badanej nawierzchni ugięcia  $u_{obl} = 2,4$  mm:

$$E_1 = \frac{q \times D \times (1 - v_z^2)}{u} = \frac{0,65 \times 0,313 \times (1 - 0,35^2)}{2,4 \times 10^{-3}} = 74,37 \text{ MPa}$$

- wyznaczenie grubości warstwy tłuczniem w oparciu o nomogram (rys. 3)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{74,37}{400} = 0,186 \quad \frac{E_z}{E_2} = \frac{244}{400} = 0,61$$

stąd z krzywej (opisanej liczbą 0,61) nomogramu (rys. 3) mamy:

$$\frac{h}{D} = 1,9 \text{ więc } h = 1,9 \times 31,3 = 59,5 \text{ cm}$$

Zaprojektowane wzmocnienie jest więc o 3,5 cm większe niż wskazuje graniczna krzywa nomogramu w [5].

## Podsumowanie

Do ugięć sprężystych większych niż 2,5 mm przy obciążeniu nawierzchni ruchem kategorii KR1, KR2 do wyznaczenia wzmocnienia należy korzystać z krzywej granicznej wynikającej z ruchu 20-letniego wyrażonego w osiach obliczeniowych N100kN/pas. Podobnie można wyznaczać wzmocnienie w innych przypadkach przy obciążeniu nawierzchni ruchem kategorii KR1–KR4, gdy ugięcie nie daje bezpośrednio szukanej grubości warstwy tłucznia, ale istnieje sąsiednia krzywa opisana grubością tej warstwy.

W Polsce nawierzchni dróg obciążonych ruchem kategorii KR1–KR4 jest najwięcej, a wiele z nich wymaga modernizacji. Ponieważ metoda ugięć sprężystych to dość łatwy sposób projektowania wzmocnienia, dlatego jest często stosowana.

Prezentowany w artykule sposób określania grubości nakładki wzmacniającej może być pomocny w projektowaniu z wykorzystaniem tej metody. Postępując, jak w przykładach, uniknie się błędnego wymiarowania nakładki wzmacniającej wynikającego z przyjęcia grubości tłucznia wg skrajnej krzywej nomogramu. Omówiona metoda może być również wykorzystana do wykazania nadmiaru nośności istniejącej konstrukcji nawierzchni.

## Bibliografia

- [1] M. Bajak, S. Firlej, *Wykorzystanie metody ugięć do projektowania wzmocnień nawierzchni drogowych*, Drogownictwo 1/2008
- [2] S. Firlej, *Mechanika nawierzchni drogowej*, Wydawnictwo Petit s.c., Lublin 2007
- [3] J. Kukielka, A. Szydło, *Projektowanie i budowa dróg, zagadnienia wybrane*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1986
- [4] S. Rolla, *Projektowanie nawierzchni*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987
- [5] Katalog Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych, Warszawa 2001
- [6] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie ■

## Z serwisu GDDKiA

### Po drodze na weekend – województwo łódzkie

Łódź oferuje mnóstwo bajecznie pięknych secesyjnych i eklektycznych kamienic oraz pałaców, wspaniałe cmentarze (katolicki, ewangelicki, prawosławny i największy na świecie żydowski, a na każdym z nich perły architektury funeralnej), słynne Centralne Muzeum Włókiennictwa, Muzeum Kinematografii i Manufaktury, a poza tym w każdym zakątku regionu możemy znaleźć coś interesującego.

Kolejnym miejscem, gdzie warto się zatrzymać jest Piotrków Trybunalski, w którym oprócz kilku interesujących kościołów wokół malowniczego rynku, można zobaczyć unikatowy XVI-wieczny późnogotycki zamek królewski zbudowany na polecenie króla Zygmunta Starego.

Kolejne atrakcje przy DK 91 czekają na nas w Łęczycy! XIV-wieczny zamek, który powstał za panowania króla Kazimierza Wielkiego stoi tuż przy drodze. Warty zobaczenia jest usytuowany zaledwie kilka kroków od zamku barokowy kościół Bernardynów ze wspaniałą polichromią Walentego Żebrowskiego.

Będąc w Łęczycy nie można ominąć tak wyjątkowego skarbu architektury sakralnej, jak archikolegiata w Tumie. To zaledwie trzy kilometry drogi trasą wojewódzką nr 703 w kierunku Łowicza. Tumska kolegiata, to największy i jeden z najpiękniejszych w Polsce kościołów w stylu romańskim.

Wyjątkowej wartości zabytek drogowy napotkamy około 4 km za Łowiczem po prawej stronie drogi nr 92. Chodzi o most drogowy profesora Stefana Bryły – wybitnego inżyniera, nauczyciela akademickiego i męża stanu II Rzeczypospolitej. To pierwszy na świecie spawany most wybudowany pod koniec lat 20. minionego wieku.

Kolejnym miejscem położonym opodal, którego nie można pominąć jest zamek w Oporowie. Unikatowość tego niewielkiego, acz urokliwego XV-wiecznego zamku polega na tym, że nigdy nie został zniszczony! W naszej historii to prawdziwy ewenement. Są w nim oryginalne modrzewiowe stropy, a wystrój to pysznie urządzone muzeum wewnątrz dworskich.

Uniejów leżący przy drodze nr 72, to jedna z najatrakcyjniejszych miejscowości regionu. Nad brzegiem Warty usytuowany jest monumentalny (pierwotnie gotycki) zamek z XIV wieku, gdzie można także przenocować i zjeść obiad. W Uniejowie istnieje także możliwość doskonale się zrelaksować, a nawet podreperować nadszarpnięte zdrowie korzystając z dobro-



Fot. 1. Most prof. Bryły w Maurzycach (fot. Internet)

dziejstw gorących źródeł. Miasto jest pierwszym w Polsce uzdrowiskiem termalnym i pierwszym uzdrowiskiem województwa łódzkiego.

W Nieborowie, opodal DK 70 jest jeden z najpiękniejszych i najcenniejszych zabytków regionu – pałac Radziwiłłów z rozległym, malowniczym parkiem z początku XVIII wieku. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że przetrwał w stanie nienaruszonym, nie tylko wojnę, ale także czasy stalinowskie. Możemy więc podziwiać wspaniałe wnętrza i zbiory. Tu kręcono wiele filmów np. serial „Lalka”. Uzupełnieniem wizyty w pałacu, jest zwiedzanie romantycznego parku w Arkadii (między Łowiczem i Nieborowem) z licznymi sztucznymi, sentymentalnymi ruinami. Powstał on pod koniec XVIII wieku, wedle mody, jaka panowała wówczas w Europie.

(20-08-2013)