

## WYKONAWSTWO STREF PRZEJŚCIOWYCH DO OBIEKTÓW MOSTOWYCH I ASPEKTY MODELOWANIA NUMERYCZNEGO ODDZIAŁYWANIA POJAZD-NAWIERZCHNIA-PODTORZE<sup>1</sup>

---

### Juliusz Sołkowski

Dr inż., Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii  
Lądowej, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego  
i Lotniczego, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel:  
(012) 628 2157, e-mail: jsolkow@pk.edu.pl

---

### Dariusz Kudła

Mgr inż., Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii  
Lądowej, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego  
i Lotniczego, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel:  
(012) 628 2390, e-mail: dkudla@pk.edu.pl

---

**Streszczenie.** *W artykule przedstawiono wyniki pomiarów sztywności nawierzchni i podtorza w obszarze obiektów mostowych, które zostały wykonane po ich modernizacji. Na podstawie danych uzyskanych z pomiarów przeprowadzono symulacje komputerowe przejazdów pociągu testowego na analizowanych odcinkach toru (siedem stref przejściowych) stwierdzając dobrą zgodność obliczeń z pomiarami co do przewidywanych ugięć szyny. Ponadto porównano obliczenia z wykorzystaniem modeli w Metodzie Różnic Skończonych z modelami w Metodzie Elementów Skończonych (2D oraz 3D), także stwierdzając dobrą zgodność wyników. Poddano dyskusji wpływ nieliniowości podłoża na uzyskiwane wyniki obliczeń oraz ewentualne rozszerzenie pomiarów.*

**Słowa kluczowe:** *strefa przejściowa, sztywność nawierzchni, sztywność podtorza kolejowego, efekt progowy*

### 1. Wstęp – cel pracy

Celem pracy jest przedstawienie problemów modelowania układu nawierzchnia-podtorze z punktu widzenia jego sztywności. Ścisłej rzecz biorąc, celem jest sprawdzenie wpływu założenia o liniowości podłoża szyny na wyznaczane ugięcia. Zagadnienie jest o tyle istotne, że pomiary sztywności wykonywane na torze - oprócz pojawienia się nieuniknionych błędów pomiarowych - są na ogół opracowywane z założeniem liniowości podłoża. Dodatkowym elementem jest porównanie wyników modelowania nawierzchni z wykorzystaniem różnych modeli obliczeniowych: MRS (układ równań różniczkowych rozwiązany z wykorzystaniem Metody Różnic Skończonych - jest to model ciągły), oraz MES 2D i MES 3D (modele z dyskretnym podparciem). Wyniki pracy mogą mieć praktyczne znaczenie przy opracowaniu metod pomiarowych dla ugięć i w konsekwencji określania sztywności układu nawierzchnia-podtorze, a także mogą rzucić pewne światło na proble-

---

<sup>1</sup> Udział autorów w publikacji: Sołkowski J. 70%, Kudła D. 30%

matykę tworzenia modeli nawierzchni. W artykule wykorzystano pomiary własne na obiektach położonych na linii nr 100 w Krakowie we wrześniu 2012 roku [10].

Z przeglądu literatury dotyczącej modelowania nawierzchni szynowych, zwłaszcza w strefach przejściowych wynika, że najczęściej szynę przedstawia się jako belkę Bernoulliego-Eulera, w której pomija się deformację przekroju poprzecznego i bezwładności rotacyjnej – uzyskuje się rozwiązanie przybliżone dla małych i średnich częstotliwości, oraz belkę Timoszenki – gdzie uwzględnia się efekty ścinania przekroju poprzecznego oraz równocześnie bezwładności rotacyjnej [1,2] - rozwiązanie dokładne dla wysokich częstotliwości (do około 2000 Hz) [11].

Podłoże modelowane jest najczęściej – mimo, że jest to najstarsze ujęcie – jako Winklera [13] bez luk pod podkładami z tłumieniem wiskotycznym lub innymi rozszerzeniami [5], albo też jako półprzestrzeń sprężysta [8]. Wykonuje się także obliczenia porównawcze z wykorzystaniem różnych modeli, np. [13], gdzie porównywano model belkowy na podłożu Winklera z modelem belkowym na półprzestrzeni sprężystej, stwierdzając dobrą zgodność wyników i wystarczalność podłoża Winklera w analizie wielu zagadnień. Często występują w literaturze modele podłoża – Pasternaka czy też Własowa – np. praca porównawcza [12]. Modele stref przejściowych, tzn. oddziaływania pojazd-nawierzchnia-podtorze w tym obszarze podane są np. w prac [4], której autor wprowadza założenie o belce Bernoulliego-Eulera na podłożu sprężystym Winklera bez tłumienia. Bardziej złożone modele stref przejściowych zaprezentowano w [6, 7, 14].

Modele wprowadzone przez Autorów niniejszego artykułu są uproszczone w sensie pojazdu, natomiast posiadają możliwość wprowadzania nieliniowości podłoża oraz dowolnej funkcji zmienności jego sztywności na długości toru.

## 2. Charakterystyka obiektów mostowych poddanych badaniom

### 2.1. *Obiekt 1: wiadukt betonowy km 10.010,00*

Masywny wiadukt żelbetowy z przęsłem płytowym o schemacie statycznym belki ciągłej trójprzęsłowej, wydzielone pod każdy tor. Przęsła posiadają rozpiętość: dla Toru nr 1:  $L=42,5$  m, dla Toru nr 2:  $L=43,40$  m. Przęsła spełniają rolę koryt balastowych zasypanych tłuczniem o grubości 35 cm. Nawierzchnia składa się z podkładów betonowych PS-94M z przytwierdzenie sprężystym SB i szyny S60 UIC ułożonej na podkładkach podszynowych PKW 60.

Po obu stronach obiektu wykonano strefę przejściową o długości 20 m na warstwie niesortu na całej długości (fot. 1). Badanie sztywności podłoża wykonano przy pomocy płyty dynamicznej, uzyskane wyniki średnie to  $E_{vd} = 33,75$  MN/m<sup>2</sup>. Na przebudowanej ścianie żwirowej zakotwiono zbrojenie płyty przejściowej o długości 6 m oraz o grubości od 45 cm przy przyczółku zmniejszającą się do 35 cm na jej końcu.



Fot. 1. Wykonanie strefy przejściowej przy obiekcie nr 1 (wiadukt betonowy (płyta przejściowa))

Bezpośrednio za płytą na długości 14 m wykonano warstwę wyrównawczą o grubości 20 cm z niesortu stabilizowanego cementem w proporcji 150 kg/m<sup>3</sup>, następnie ułożony został materac z geokraty o wysokości 20 cm zasypany niesortem. Następnie ułożono warstwę ochronną o grubości 10 cm oraz warstwę tłucznia.

### 2.2. Obiekt nr 2: Wiadukt stalowy km 10.415,00

Wiadukt stalowy jednoprzęsłowy blachownicowy z jazdą górą, rozpiętość  $L=16$  m. Nawierzchnia na obiekcie składa się z szyny S60 E1 na mostownicach z drewna twardego, Typu II z przytwierdzeniem Typu K. Na odcinku najazdowym i zjazdowym zastosowano podkłady betonowe PS 94 M z przytwierdzeniem sprężystym SB oraz przekładkami podszynowymi PKW 60A.

Wzmocnienie rejonu strefy przejściowej wykonano w postaci klina z 4 warstw geokraty wypełnionej zasypką stabilizowaną cementem (fot. 2). Pierwsza warstwa ma długość 5 m, a każda kolejna jest dłuższa o 2 m od poprzedniej. Badanie nośności podłoża wykonano przy pomocy płyty dynamicznej, uzyskane wyniki średnie to  $E_{vd} = 44,55$  MN/m<sup>2</sup>.

Podłoże pod pierwszą warstwą zostało odpowiednio zagęszczone i ułożony został dren filtracyjny wzdłuż ścian przyczółka. Na ostatniej warstwie ułożona została warstwa ochronna z niesortu o grubości 10 cm, a następnie warstwa tłucznia.

### 2.3. Obiekt nr 3: Wiadukt stalowy km 10.552,00

Wiadukt stalowy jednoprzęsłowy blachownicowy z jazdą górą, rozpiętość  $L=16$  m. Nawierzchnia na obiekcie składa się z szyny S60 E1 ułożonej na mostownicach z drewna twardego, Typu II z przytwierdzeniem Typu K. Na odcinku najazdowym i zjazdowym zastosowano podkłady betonowe PS 94 M z przytwierdzeniem sprężystym SB oraz przekładkami podszynowymi PKW 60A.

Wzmocnienie rejonu strefy przejściowej wykonano w postaci klina z 4 warstw geokraty wypełnionej zasypką stabilizowaną cementem. Pierwsza warstwa ma długość 5 m, a każda kolejna jest dłuższa o 2 m od poprzedniej. Badanie nośno-

ści podłoża wykonano przy pomocy płyty dynamicznej, uzyskane wyniki średnie to  $E_{vd} = 37,1 \text{ MN/m}^2$ . Podłoże pod pierwszą warstwą zostało odpowiednio zagęszczone i ułożony został dren filtracyjny wzdłuż ścian przyczółka. Na ostatniej warstwie ułożona została warstwa ochronna z niesortu grubości 10 cm, a następnie warstwa tłucznia.



Fot. 2. Wykonanie strefy przejściowej (wiadukty z jazdą na mostownicach):  
a) obiekt nr 2, b) obiekt nr 3, klin z geokraty i zasyпки stabilizowanej cementem

#### 2.4. Most stalowy km 10.847,00 przez rzekę Wisłę w Krakowie

Most stalowy ośmioprzęsłowy, przeszła skrajne blachownicowe spawane, z jazdą góra, przeszło środkowe kratownicowe nitowane, z jazdą dołem. Długość obiektu w torze nr 1  $L=309,3 \text{ m}$ , w torze nr 2  $L=312,30 \text{ m}$ . Nawierzchnia na obiekcie składa się z szyn S60 E1 z przytwierdzeniem klasycznym Typ K, podkładów drewnianych z drewna twardego Typ I na przęsle kratownicowym oraz Typ II - przeszła skrajne. Na dojeździe i na zjeździe z obiektu zastosowano podkłady betonowe PS 94 z przytwierdzeniem sprężystym SB, szyna została ułożona na przekładce podszynowej PKW 60.

Bezpośrednio za przyczółkiem ułożono geokratę komórkową o wysokości 20 cm i długości 8 m. Na geokracie znajduje się warstwa ochronna o grubości 10 cm i warstwa posypki tłuczniowej. Geokrata została zasypana niesortem frakcji 0-32 mm. Podłoże pod geokratą zostało wykonane z niesortu stabilizowanego cementem w proporcjach  $150 \text{ kg/m}^3$ , grubość warstwy jest zmienna, ponieważ ułożona jest ze spadkiem 5% w stronę od obiektu. Badanie sztywności podłoża wykonano przy pomocy płyty dynamicznej uzyskując wyniki średnie  $E_{vd} = 37,7 \text{ MN/m}^2$ .

### 3. Wyniki pomiarów sztywności nawierzchni i podtorza

Do badań sztywności nawierzchni i podtorza wykorzystano zestaw składający się z wózka motorowego typu WM 15A oraz wagonu samowyladowczego typu TMS 40.01 (fot. 3).



Fot. 3. Rozmieszczenie latek niwelacyjnych w na szynach {10}

Do pomiarów użyto niwelatory precyzyjne z kompletem latek geodezyjnych umieszczonych na szynie. W badaniach wykorzystano dwa niwelatory precyzyjne: Zeiss Ni007 oraz Trimble DiNi 0.3. Łatki pomiarowe umieszczone zostały w każdym punkcie przekroju, a odczyty wykonane były z dokładnością do  $\pm 0,1$  mm.

W najprostszym ujęciu sztywność nawierzchni, przy założeniu liniowej charakterystyki podłoża, nazywana także współczynnikiem odsprężynowania, określona jest jako stosunek siły pionowej przyłożonej do szyny do jej ugięcia. Stosowanie teorii belki Bernoulliego-Eulera na podłożu sprężystym Winklera budzi zastrzeżenia z uwagi na linearyzację odporu podłoża. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wpływu takiej linearyzacji na wyniki obliczeń sztywności i modelowania numerycznego. W modelu liniowym sztywność układu nawierzchnia-podłoże w przekroju toru wyznaczona jest ze wzoru:

$$k_i = \frac{P}{w_{sr'i}} \quad (1)$$

gdzie:

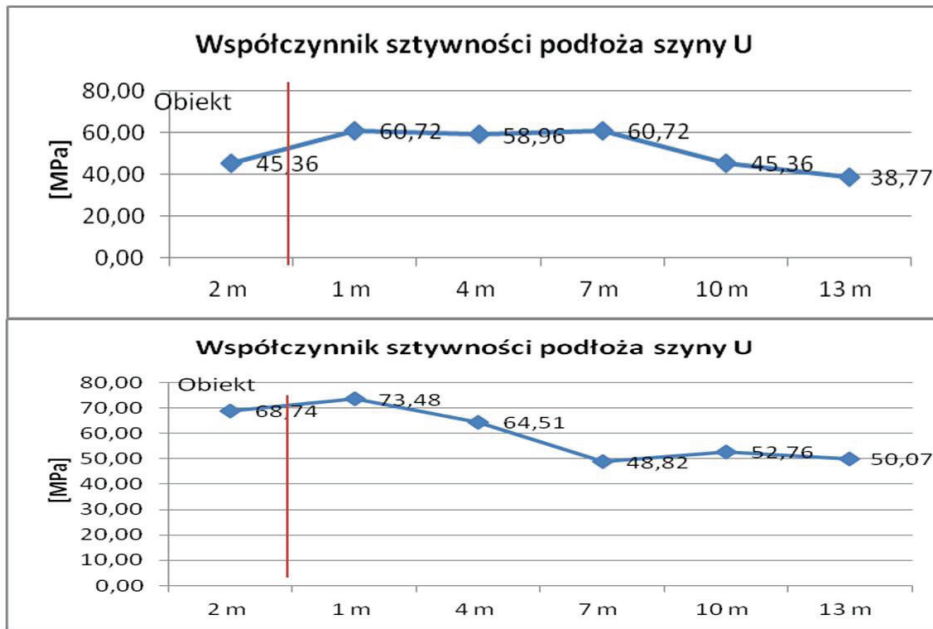
$P$  [kN] – nacisk statyczny koła (1/2 nacisku osi wagonu TMS 40.01, który wynosi 220 kN),

$w_{sr'i}$  [m] - średnie ugięcie obu toków szynowych w danym przekroju toru.

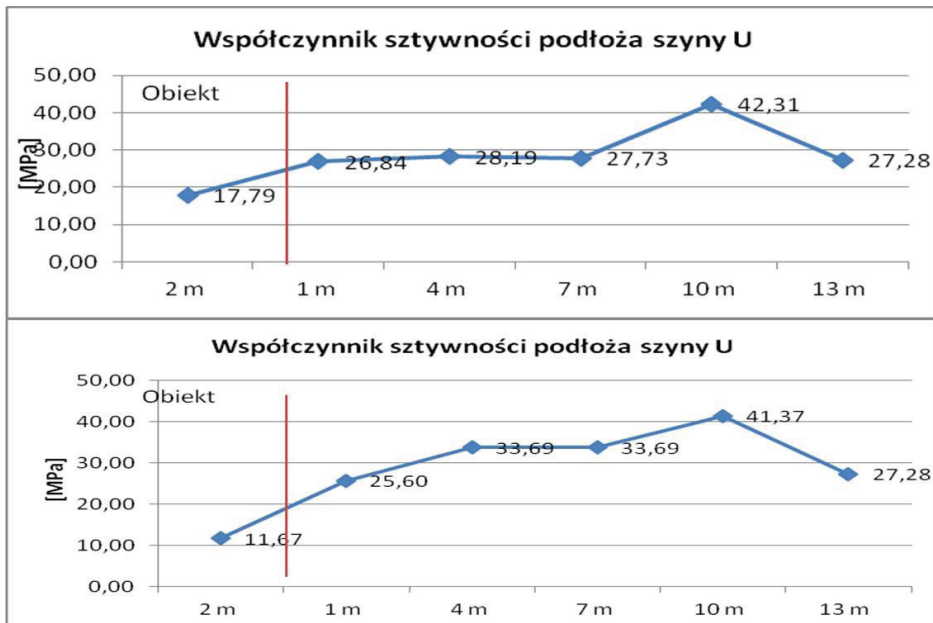
Współczynnik sztywności podłoża szyny  $U$  w  $i$ -tym przekroju wyznaczono ze wzoru:

$$U_i = \frac{1}{4} \sqrt[3]{\frac{k_i^4}{EI}} \quad (2)$$

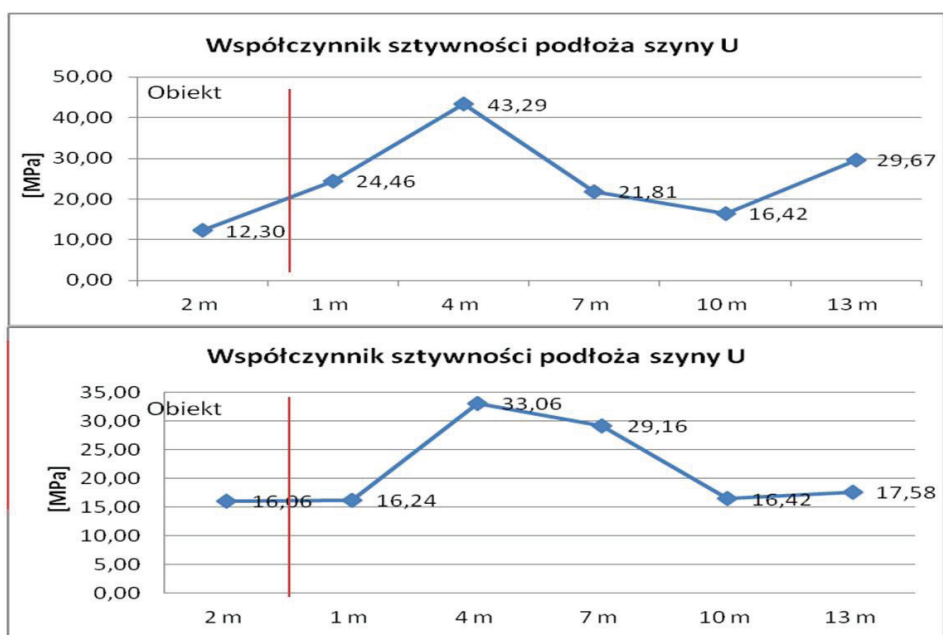
Rozkłady współczynnika podłoża szyny na długości toru przedstawiono na rys. 1-4.



Rys. 1. Obiekt 1: rozkład współczynnika podłoża szyny na długości toru, a) strona północna, b) strona południowa, pomiar pod obciążeniem statycznym



Rys. 2. Obiekt 2: rozkład współczynnika podłoża szyny na długości toru, a) strona północna, b) strona południowa, pomiar pod obciążeniem statycznym



Rys. 3. Obiekt 3: rozkład współczynnika podłoża szyny na długości toru, a) strona północna, b) strona południowa, pomiar pod obciążeniem statycznym



Rys. 4. Obiekt 4: rozkład współczynnika podłoża szyny na długości toru - strona północna, pomiar pod obciążeniem statycznym

#### 4. Obliczenia numeryczne nawierzchni w strefie przejściowej

##### 4.1 Model obliczeniowy - model MRS

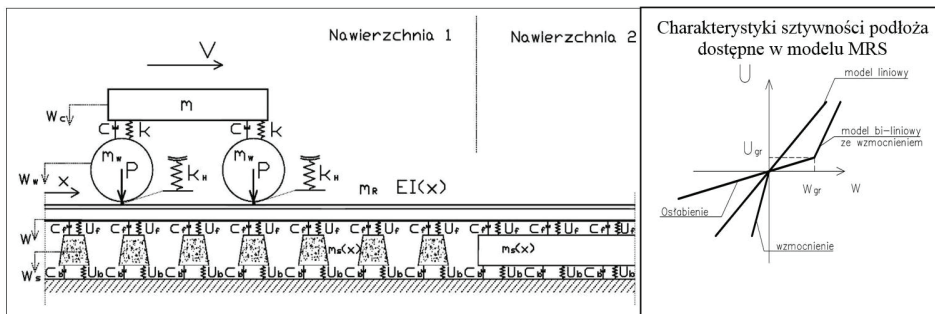
Celem przyjętego modelu jest uwzględnienie następujących elementów, które w sposób istotny wpływają na efekt progowy:

- niejednorodności podłoża co do jego sztywności oraz tłumienia,
- zróżnicowania więzów podłoża - tzn. sztywności na docisk i odrywanie szyny od podłoża,

- zmienności masy belki lub/i podbudowy (względnie podkładów),
- występowania luk pod podkładami,
- nieliniowości reakcji podłoża przy docisku szyny (mała sztywność we wstępnej fazie docisku i usztywnienie przy większych ugięciach).

W prezentowanych poniżej przypadkach obliczeniowych stosowany jest model numeryczny z wykorzystaniem Metody Różnic Skończonych. Model zaimplementowano w programie STREFA\_04. Model został opisany w [9] i jest przedstawiony na rys. 5. Odpowiedź układu nawierzchnia-podłoże opisana jest układem pięciu równań różniczkowych cząstkowych. Oznaczenia są następujące:

- $w_c$  - przemieszczenie pionowe wózka pojazdu (nie uwzględniono obrotów),
- $w_w^1, w_w^2$  - przemieszczenie pionowe koła pierwszego i drugiego,
- $w$  - ugięcie szyny,
- $w_s$  - przemieszczenie pionowe podkładów lub podbudowy nawierzchni bezpodsypkowej,
- $x$  - współrzędna wzdłuż osi toru,
- $x_1, x_2$  - współrzędne koła pierwszego i drugiego,
- $m$  - masa usprężynowana obciążająca zestaw kołowy,
- $m_w$  - masa koła,  $m_R(x)$  - jednostkowa masa szyny,  $m_s(x)$  - masa podkładów lub podbudowy nawierzchni bezpodsypkowej na jednostkę długości toru,
- $c$  - współczynnik tłumienia zawieszenia koła,
- $k$  - współczynnik sprężystości zawieszenia koła,
- $k_H$  - współczynnik sprężystości kontaktu koło-szyna (sprężyna Herza),
- $E$  - moduł Younga stali szynowej,
- $I = I(x)$  - moment bezwładności przekroju poprzecznego belki (szyny),
- $U_f$  - współczynnik sztywności podparcia szyny (przytwierdzenie),
- $c_f$  - współczynnik tłumienia podparcia szyny (przytwierdzenie),
- $U_b$  - współczynnik sztywności podparcia podkładu, zależny od znaku przemieszczenia,
- $c_b$  - współczynnik tłumienia podparcia podkładów,
- $P$  - siła koło-szyna.



Rys. 5. Model MRS. Nawierzchnia nr 1 reprezentuje nawierzchnię podsypkową w strefie przejściowej, nawierzchnia nr 2 reprezentuje nawierzchnię na obiekcie mostowym [9]



## 4.2. Wyniki obliczeń

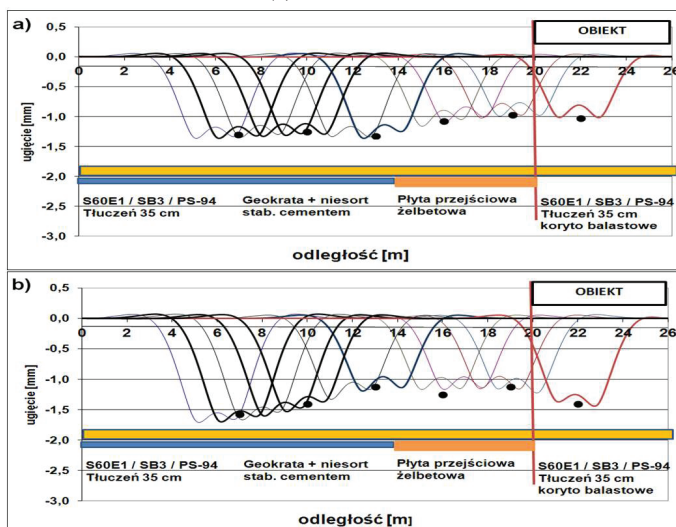
Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń dynamicznych linii ugięcia szyny w strefie przejściowej i na obiekcie z wykorzystaniem danych dotyczących sztywności układu nawierzchnia-podłoże uzyskanych z pomiarów ugięć statycznych. We wszystkich przypadkach obliczeniowych, tak jak w torze poddanemu badaniom, zastosowano szyny 60E1.

W obliczeniach założono, że współczynniki podparcia podkładów  $U_b$  oraz współczynnik sztywności podparcia szyny  $U_f$  (przytwierdzenie) są takie same, dzięki czemu zastosowano jeden zastępczy współczynnik podłoża szyny  $U = U_f = U_b$  (bo taki był wyznaczony z pomiarów). Masę belki na jeden metr długości toru obliczono w następujący sposób: masa szyny (wynosząca 60kg) plus 1/2 masy podkładu PS-94 (wynosząca 160 kg), dzielone przez rozstaw podkładów (wynoszący 0,6m), co daje łącznie 326 kg. We wszystkich przypadkach obliczeniowych przyjęto jednakowy oraz stały na długości toru współczynnik tłumienia wiskotycznego  $c = c_f = c_b = 100 \text{ kN s/m/m}$ , w granicach zgodnych z [15]. Dane pojazdu (wózka dwuosowego) do obliczeń są podane w Tabeli 1. Wyniki obliczeń dynamicznych linii ugięcia szyny przedstawiono na rys. 6-9.

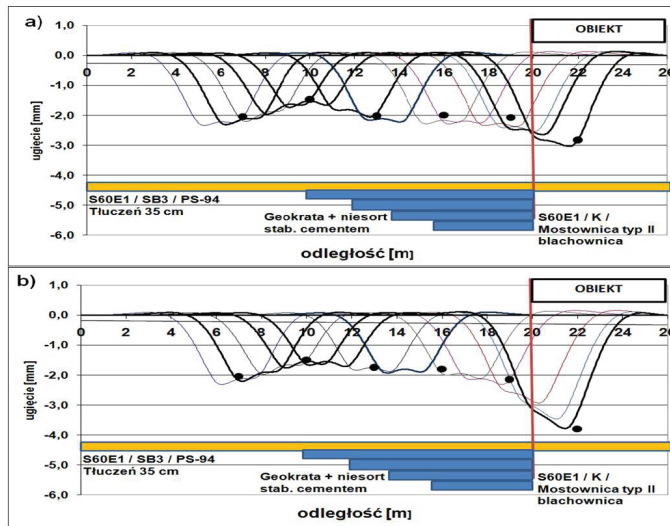
Tabela 1. Parametry mechaniczne wózka przyjętego do obliczeń

Parametr	Oznaczenie	Dane dla 1/2 osi
Statyczny nacisk koła (jak w wagonie TMS 40.01)	$P$	110 kN
Masa ramy wózka na 1/2 toru (*)	$m$	5000 kg
Masa koła wraz 1/2 osi (*)	$m_w$	1180 kg
Sztywność zawieszenia pojedynczego koła (*)	$k$	2240 kN/m
Współczynnik tłumienia pojedynczego koła (*)	$c$	60 kN s/m
Rozstaw osi	$d$	1.8 m
Prędkość	$v$	20÷60 km/h
Sztywność Herza	$k_H$	$10^6 \text{ kN/m}$

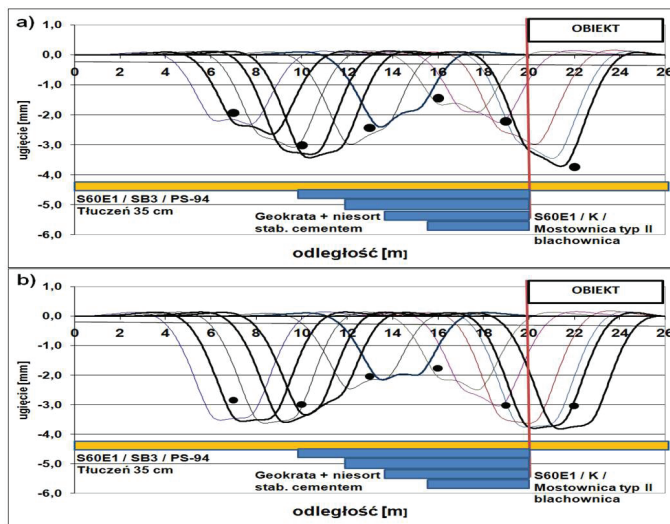
(\*) dane szacunkowe



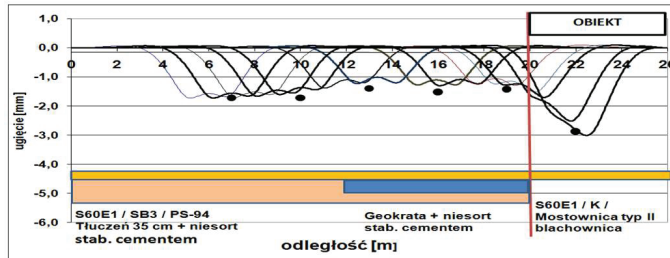
Rys. 6. Obiekt 1: linie ugięcia szyny w strefie przejściowej z obliczeń, a) strona północna, b) strona południowa,  $v=60 \text{ km/h}$  (wyniki pomiarów statycznych ugięć szyny oznaczono punktami)



Rys. 7. Obiekt 2: linie ugięcia szyny w strefie przejściowej z obliczeń, a) strona północna, b) strona południowa,  $v=60$  km/h (wyniki pomiarów statycznych ugięć szyny oznaczono punktami)



Rys. 8. Obiekt 3: linie ugięcia szyny w strefie przejściowej z obliczeń, a) strona północna, b) strona południowa,  $v=60$  km/h (wyniki pomiarów statycznych ugięć szyny oznaczono punktami)



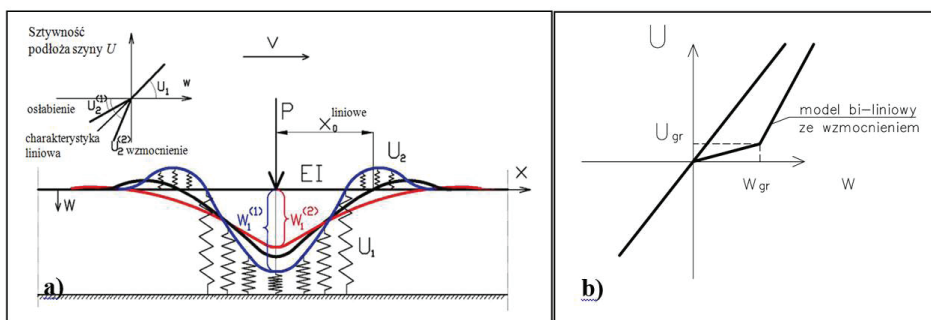
Rys. 9. Obiekt 4: linie ugięcia szyny w strefie przejściowej z obliczeń - strona północna,  $V=60$  km/h (wyniki pomiarów statycznych ugięć szyny oznaczono punktami)

### 4.3. Obliczenia porównawcze - modele MRS oraz MES 2D i MES 3D

Do obliczeń porównawczych wykorzystano:

- opisany powyżej model MRS (pkt. 4.1), w którym zastosowano jeden zastępczy współczynnik podłoża szyny  $U = U_f = U_b$  (rys. 5),
- model MES 2D (rys. 12),
- model MES 3D (rys. 13).

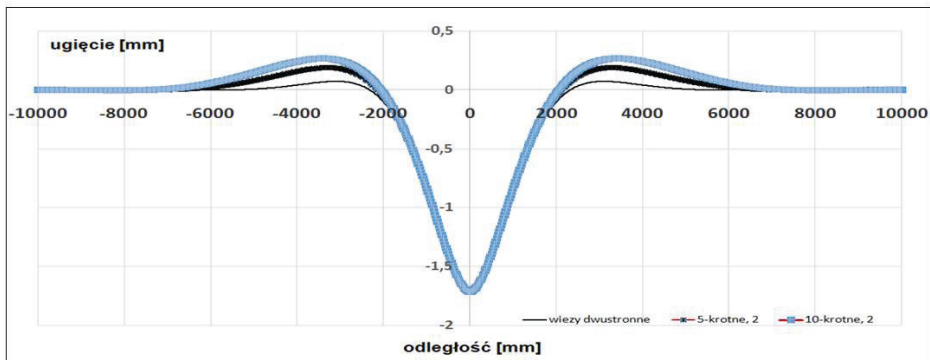
Celem obliczeń porównawczych było sprawdzenie zasadności przyjętych założeń dotyczących toru oraz (a właściwie przede wszystkim) sprawdzenie wpływu założenia dotyczącego liniowości podłoża na ugięcia belki. W tym celu wykorzystano model podłoża mający jeden parametr  $U$ , ale o zróżnicowanych charakterystykach na docisk i na unoszenie szyny (rys. 10). Dane do obliczeń porównawczych zestawiono w Tabeli 2. Obliczenie w modelach MES są quasi-statyczne - w tym przypadku w modelu MRS przyjęto, że prędkość poruszającej się siły wynosi 20 km/h.



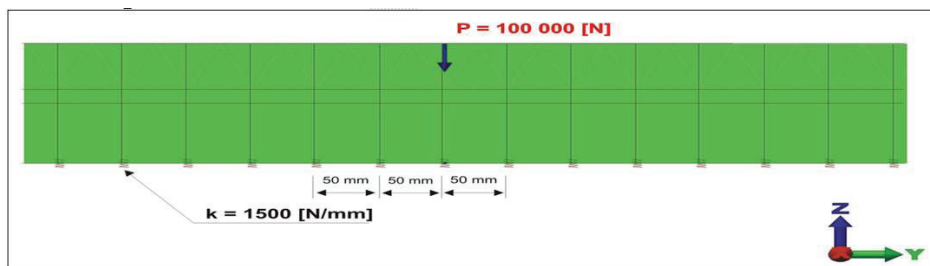
Rys. 10. Model podłoża przyjęty do obliczeń: a) porównawczych MRS oraz MES 2D i MES 3D,  $w_1^{(1)}$ ,  $w_1^{(2)}$  - ugięcia w strefie centralnej,  $U_2^{(1)}$ ,  $U_2^{(2)}$  - sztywności w strefie uniesienia szyny,  $x_0^{\text{liniowe}}$  - odległość do miejsca zerowego przemieszczeń w modelu liniowym, b) porównania w modelu MRS przypadku z podłożem liniowym oraz bi-liniowym ze wzmocnieniem - por. badania doświadczalne np. [3].

Tabela 2. Parametry nawierzchni do obliczeń z nieliniowym podłożem

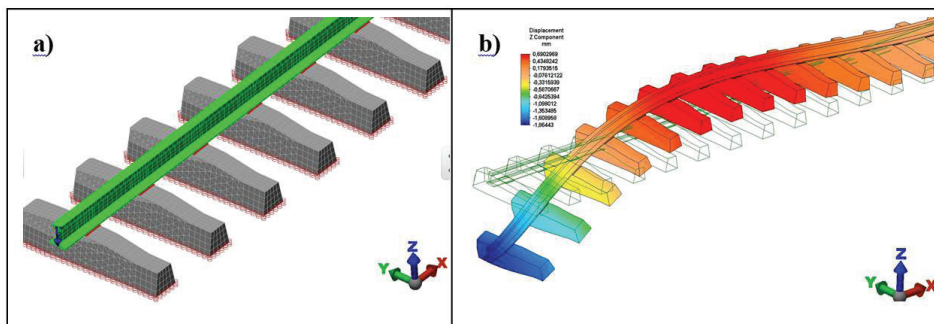
Parametry		Przypadki charakterystyki nawierzchni		
		Sztywność podłoża szyny (model liniowy)	Sztywność w strefie unoszonej (5- krotne osłabienie)	Sztywność w strefie unoszonej (10- krotne osłabienie)
Sztywność zginania belki	$EI$ [MN · m <sup>2</sup> ]	6.42	6.42	6.42
Ciężar jednostkowy	$m$ [kG]	326	326	326
Sztywność podłoża szyny	$U$ [MPa]	30	6	3
Współczynnik tłumienia	$c$ [kNs/m <sup>2</sup> ]	100	100	100



Rys.11. Porównanie ugięć szyny w modelach MRS oraz MES 2D i MES 3D przy więzach niesymetrycznych (osłabienie w strefie unoszenia szyny 5-krotne i 10-krotne), różnice są niewidoczne na rysunku w tej skali i wynoszą: dla maksimum=0.022 mm oraz dla podniesienia=0.009 mm



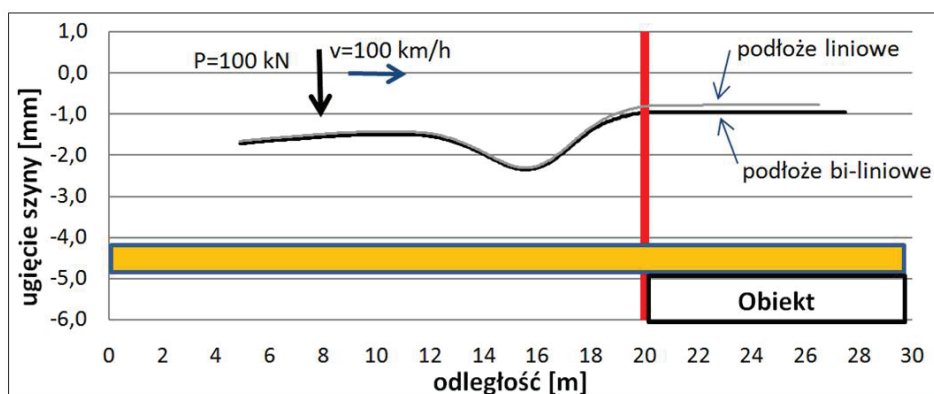
Rys.12. Model MES 2D



Rys. 13 a) Model MES 3D - sztywność podłoża podkładów została dobrana poprzez zastosowanie elementów brzegowych na spodzie podkładów, b) układ odkształcony - z uwagi na symetrię pokazano jedną stronę toru

Wpływ bi-liniowości współczynnika sztywności podłoża (rys.10 b) na rozkład ugięć szyny pokazano na rys. 14, gdzie porównano maksymalne ugięcia dynamiczne pod poruszającą się osią o nacisku statycznym 100 kN i prędkości 100 km/h. Przyjęto dwa modele podłoża:

- liniowy o sztywności  $U=30$  MPa,
- bi-liniowy o sztywności początkowej równej  $U_{pocz}=3$  MPa (dla przemieszczeń mniejszych niż 0.7 mm), a dla przemieszczeń większych  $U=30$  MPa.



Rys. 14. Przykład obliczeniowy ilustrujący wpływ bi-liniowej charakterystyki podłoża w stosunku do liniowej (Rys. 10 b)

Przyjęto jedną oś o parametrach sztywności zawieszenia, masach i tłumieniu jak w Tabeli 1.

Pokazano obwiednię ugięć maksymalnych szyny w strefie przejściowej i na obiekcie.

Różnice ugięć są mniejsze niż 0.19 mm.

## 6. Podsumowanie i wnioski końcowe

### *Wnioski odnośnie wykonawstwa*

Wszystkie strefy przejściowe zabudowane na tym odcinku dają zadawalające efekty. Świadczą o tym wysokie współczynniki sztywności uzyskane na odcinkach badawczych oraz stosunkowo niewielkie różnice ugięć szyny pomiędzy nawierzchnią na obiekcie i po za nim. Najlepsze efekty uzyskano na odcinkach badawczych przy obiekcie numer 1 (obiekt z korytem balastowym) ponieważ różnice sztywności podłoża i ugięcia szyny są najmniejsze, należy jednak brać pod uwagę fakt, iż rodzaj nawierzchni na obiekcie i po za nim jest taki sam ze względu konstrukcji przęsła tego wiaduktu, co ma niebagatelny wpływ na zniwelowanie wpływu „efektu progowego”.

Zaobserwowano efekt większej sztywności w strefach przejściowych niż na obiektach. Wystąpił on zarówno na obiekcie z korytem balastowym (mniej widoczny), ale także (najbardziej) na obiektach z mostownicami. Wydaje się, że efekt ten należy przypisać faktowi, że mostownice były nowe, „nieulożone” w siodełkach.

Jeśli chodzi o wpływ konstrukcji nasypu na sztywność (geokraty, płyta przejściowa), można zaobserwować znaczny wzrost sztywności układu nawierzchnia-podtorze w przypadku zastosowania geokrat, który jest znacznie większy niż w przypadku zastosowania płyty przejściowej. W tym przypadku zastosowanie geokrat spowodowało mniej płynną zmianę sztywności (jednakże nie jest to wniosek ogólny dotyczący zastosowania geokrat).

Wnioski powyższe należy jednakże ograniczyć do pierwszego okresu pracy toru i nasypów – tuż po remoncie. W celu określenia dalekosiężnych skutków należy przeprowadzić analogiczne badania powtórnie w dalszych fazach eksploatacji linii.

#### *Wnioski odnośnie pomiarów i obliczeń numerycznych*

W artykule przedstawiono porównanie ugięć obliczonych i zmierzonych. Można stwierdzić dobrą zgodność pomiarów w terenie z obliczeniami numerycznymi.

Co do wpływu bi-liniowej charakterystyki podłoża na ugięcia szyny można stwierdzić, że wpływ ten uwidacznia się szczególnie przy sztywnej nawierzchni (rys. 14) - w prezentowanych obliczeniach jest mniejszy niż 0.2 mm. Wpływ asymetrii podłoża szyny (tzn. mniej sztywne na unoszenie, a bardziej sztywne na docisk) jest znaczący dla powstawania dłuższych linii ugięcia szyny. Efekt ten wymaga dalszych testów numerycznych.

Różnice wyników uzyskanych z modeli MRS oraz MES 2D i MES 3D są małe. Na ogół, jeśli chodzi o ugięcia szyny są bliskie 0.02 mm lub mniejsze. Świadczy to o dobrym przybliżeniu pracy toru rzeczywistego w tym zakresie, biorąc pod uwagę także dobrą zgodność z pomiarami.

Koniecznym jest przeprowadzenie badań (tzn. pomiarów oraz analiz numerycznych) z większymi prędkościami pojazdów. Należy także uzupełnić analizę linii ugięcia poprzez uwzględnienie prędkości oraz przyspieszeń szyn i podkładów.

#### Literatura

- [1] Bogacz R., Krzyżyński T., O belce Bernoulliego-Eulera spoczywającej na lepkosprężystym podłożu poddanej działaniu ruchomego oscylacyjnego obciążenia. Prace IPPT-PAN, Reports 38, 1986
- [2] Bogacz R., Nowakowski S. On the influence of damping on the critical speed of spring-mass system moving along a Timoshenko beam on an elastic foundation. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 3, 30, 1992, 607-623.
- [3] Grol, W., Gąsiński T., Szolc, T., Doświadczalne badanie własności dynamicznych i statycznych toru kolejowego w warunkach Polskich Kolei Państwowych. Pojazdy Szynowe, 2002, nr 3, s. 46-52.
- [4] Hunt H.E.M., Settlement of railway track near bridge abutment. Proc. Instn Civ. Engrs, Transp. ,123, 1997, 68-73.
- [5] Jemielita G., Generalization of the Kerr foundation model. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 4, 30, 1992, 843-853.
- [6] Lei X., Mao L., Dynamic response analyses of vehicle and track coupled system on track transition of conventional high speed railway. Journal of Sound and Vibration 271, 2004, 1133-1146.

- [7] Lei X., Noda N.A., Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile. *Journal of Sound and Vibration* 258(1), 2002, 147–165.
- [8] Savidis S., Bode C., Hirschauer R. & Hornig J., Dynamoc soil-structure interaction with partial uplift. *Structural Dymaics - EURODYM*, Fryba & Naprstek (eds) 1999 Balkema, Rotterdam.
- [9] Sołkowski J., Efekt progowy w nawierzchniach szynowych. Monografia Politechniki Krakowskiej, Kraków 2013.
- [10] Sołkowski J., Lisowski S., Jamka M., Pawlak A., Zarys metodyki badania sztywności nawierzchni i podtorza w strefach przejściowych do obiektów inżynierskich i na obiektach. XI Ogólnopolska Konferencja „Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie”, Zakopane, 5-7 grudnia 2012.
- [11] Strzyżakowski Z., Willner K., Rail vibrations in the high frequency range. *ZAMM*, 72, 4, 1992, T132-T134.
- [12] Szcześniak W., Statyka, dynamika i stateczność nawierzchni i podtorza kolejowego, przegląd podstawowych pozycji literatury. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej Budownictwo*, z. 129, 1995, 1-220.
- [13] Vostroukhov A.V., Metrikine A.V., Periodically supported beam on a visco-elastic layer as a model for dynamic analysis of a high-speed railway track. *Int. J. Solids and Structures*, no. 40, 2003.
- [14] Zhai W.M., True H., Vehicle-track dynamics on a ramp and on a bridge: simulation and measurement. *Vehicle System Dynamics*, Suppl. 33, 2000, 604-615.
- [15] Czczyła W., Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej. Monografia 126, Politechnika Krakowska, Kraków 1992.

### Podziękowanie

Autorzy pragną podziękować Panu Kamilowi Wcisło za pomoc w realizacji badań doświadczalnych oraz za udostępnienie zamieszczonych fotografii.