

# Stacyjna analiza wybranych imperfekcji podłoża szynowego na dodatkowe ugięcia szyny bezстыkowego toru kolejowego

## Static analysis of chosen imperfections of rail subgrade on additional rail deflection of jointless track



**Włodzimierz Bednarek**

dr hab. inż.

Politechnika Poznańska  
Wydział Budownictwa i Inżynierii  
Środowiska, Zakład Budowy  
Mostów i Dróg Kolejowych

wlodzimierz.bednarek@put.  
poznan.pl

**Streszczenie:** W artykule przeanalizowano wybrane imperfekcje podłoża szynowego powodujące dodatkowe ugięcia szyny bezстыkowego toru kolejowego. Do takich imperfekcji zaliczono następujące zagadnienia: praca bezстыkowego toru kolejowego spoczywającego na lokalnych nierównościach podłoża, brak kontaktu toru kolejowego z podłożem, wpływ zmiennej siły ściskającej na długości toru kolejowego, zmiana sztywności podparcia na ugięcia szyny bezстыkowego toru kolejowego. Przeprowadzona statyczna analiza wskazała na znaczenie niekorzystnego wpływu wybranych czynników na pracę bezстыkowego toru kolejowego (np. wzrost długości braku kontaktu toru z podłożem czy powstające dodatkowe ugięcia szyny toru kolejowego). Zwrócono uwagę, że takie imperfekcje, oprócz obliczonych dodatkowych ugięć i naprężeń, powodują m. in. zaburzenia ruchu postępowego taboru kolejowego wskutek powstających imperfekcji. W pracy szczególnie nacisk położono na unaocznienie wpływu poszczególnych czynników na pracę szyny bezстыkowego toru kolejowego, podając w wielu miejscach w pracy, odpowiednie publikacje, w których w sposób wyczerpujący zawarty jest pełny tok teoretycznej analizy rozważanych zagadnień.

**Słowa kluczowe:** Tor bezстыkowy; Imperfekcje w torze; Niejednorodność podłoża szynowego; Dodatkowe ugięcia

**Abstract:** In the paper the chosen imperfections of railway subgrade causing on additional rail deflections in jointless tracks were analyzed. For such imperfections the following problems were selected: CWR track work resting on local subgrade unevenness, contact loss between track and roadbed, influence of variable compressive force on the length of jointless track, change of support stiffness on rail deflection of CWR track. The presented static analysis has shown the meaning of unfavorable influence of selected factors on CWR track work (e.g. length increase of contact loss between track and subgrade or arising an additional deflections and stresses). A special attention was paid that such imperfections, apart from obtained additional deflections and stresses, cause among other things a disturbance of translational motion of rolling stock due to arising imperfections. In the paper a special accent was laid on visualization the influence of selected factors on work of CWR track rail, giving in many places in the paper the proper publications, in which in the comprehensive way the complete procedures of theoretical analysis of considered problems are shown.

**Keywords:** Jointless track; Imperfections in track; Non-homogeneity of rail subgrade; Additional rail deflections

Stan toru kolejowego oraz jego ukształtowanie i położenie, opisywane za pomocą parametrów geometrycznych, ulega stopniowej zmianie podczas eksploatacji [2]. Powstające zmiany geometrycznego położenia toru następują głównie wskutek obciążeń od pojazdów, zmian jego podparcia oraz robót wykonywanych w torze (podbijanie toru, oczyszczanie podsypki). Przyczyną deformacji toru jest zróżnicowanie charakterystyk podparcia toru [2,3,4,9,10] w różnych jego przekrojach powstające wskutek np. nierównomiernego osiadania podsypki w czasie eksploatacji, zwiększonych odkształceń zwłaszcza w strefie tzw. słabego pod-

torza, wychłapek (rys. 1), czy występowania w podtorzu gruntów wysadzinowych.

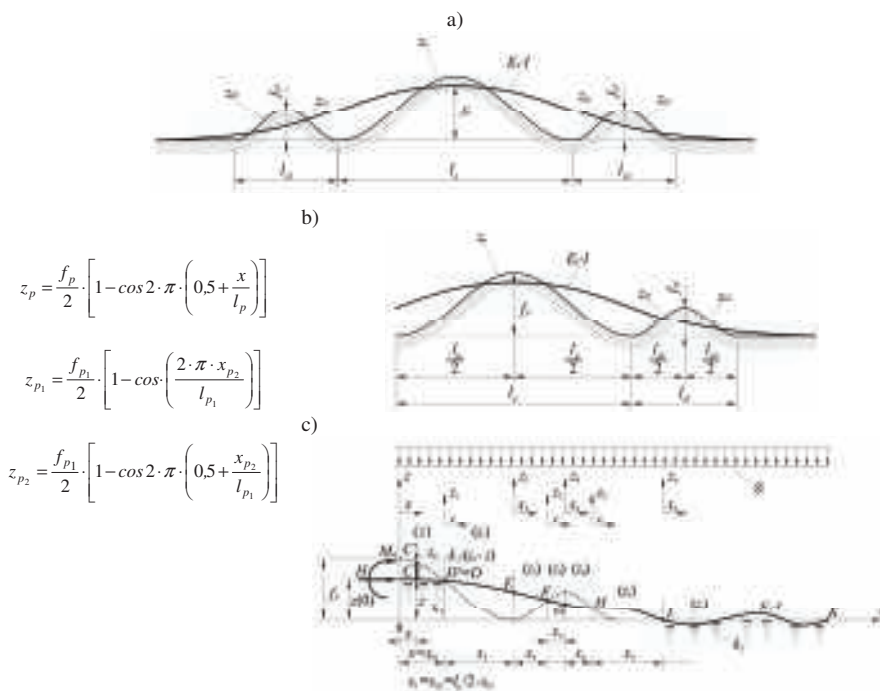
Wskutek formującej się nierówności czynniki te są powodem powstawania

różnej postaci kontaktu podkładu z warstwą podsypki. Sztywność toru w stanie nieobciążonym (bez nacisków od pojazdów) powoduje, że podkłady w różnym stopniu opierają się na pod-



1. Ugięcie toru kolejowego w rejonie wychłapek

a) tor bez obciążenia, b) tor pod obciążeniem taborem (widoczne zmniejszenie luk pod podkładami) [22]



2. Schemat obliczeniowy dla trzech nierówności podłoża

a) schemat trzech nierówności podłoża,

b) przyjęte nierówności podłoża; c) schemat obliczeniowy z układami lokalnymi

sypce. W najbardziej niekorzystnym przypadku może wystąpić zupełny brak kontaktu podkładu z podsypką (co wyraźnie widać na rys. 1). Takie obszary braku kontaktu toru z podłożem podsypkowym są szczególnie niebezpieczne dla stateczności toru bezстыkowego latem w okresie występowania podłużnych sił ściskających.

W torze nieobciążonym trudno ocenić skutki takich miejscowych nierówności dla pracy toru kolejowego w płaszczyźnie pionowej. Zmieniający się sposób podparcia toru można opisać dopiero w torze obciążonym, po przyłożeniu nacisku pochodzącego np. od osi lokomotywy. Powstające niejednorodności podłoża szynowego są źródłem dodatkowych ugięć i naprężeń szyny pod obciążeniem użytkowym [5,9,10,18]. Analizowane w pracy imperfekcje, powstające w czasie eksploatacji toru [6], mają charakter losowy i niezamierzony.

## Analiza statyczna bezстыkowego toru kolejowego spoczywającego na lokalnych nierównościach podłoża

W niniejszym punkcie rozważa się bezстыkowy tor kolejowy spoczywający na trzech, kolejno następujących po sobie nierównościach podłoża jak po-

kazano na rys. 2a [5,8]. Analizę pracy toru przeprowadzono na sprężystym jednoparametrowym podłożu z więzami jednostronnymi i dwustronnymi [5,12,13,19,20]. Na rys. 2b przedstawiono schemat obliczeniowy dla trzech nierówności podłoża. Z uwagi na symetrię układu rozpatruje się prawą stronę nierówności podłoża – rys. 2c [5].

Pomijając tok wyprowadzenia, zawarty w pracy [5], wpływ takiej powstającej nierówności zobrazowano przykładami obliczeniowymi. Przyjęto następujące dane: tor z szynami 60E1, podkłady drewniane,  $E_s \cdot I = 12,831 \text{ MNm}^2$  (sztywność toru),  $g_t = 0,0026 \text{ MN/m}$  (ciężar toru),  $k = 41,0 \text{ MPa}$  (współczynnik podłoża podsypkowego),  $H = 1,837 \text{ MN}$  (siła ściskająca), oraz nierówności podłoża (rys. 2). Celem porównania przeanalizowano też wpływ tylko pojedynczej nierówności:

I przypadek (pojedyncza nierówność podłoża)

$$1^\circ f_p = 0,02 [m]; l_p = 14,0 [m],$$

$$R_p = \frac{l_p^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot f_p} = 496,47 \text{ m}$$

(środkowa nierówność),

2° brak bocznych nierówności, czyli

$$f_{p1} = 0.$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy można opisać zachowanie się toru bezстыkowego spoczywającego na **pojedynczej nierówności podłoża**. Odcięte przekrojów charakterystycznych toru są następujące:

$x_D = 2,8759 \text{ m}$ ,  $x_{1E} = 4,6387 \text{ m}$  (gdzie: parametry  $x_D$  i  $x_{1E}$  pokazano na rys. 2c).

II przypadek (potrójna nierówność podłoża)

$$1^\circ f_{p1} = 0,0018 [m]; l_{p1} = 6,0 [m],$$

$$R_{p1} = \frac{l_{p1}^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot f_{p1}} = 1013,21 \text{ m}$$

(boczna nierówność),

$$2^\circ f_p = 0,02 [m]; l_p = 14,0 [m]$$

(środkowa nierówność).

Na podstawie przeprowadzonej analizy można opisać zachowanie się toru bezстыkowego spoczywającego na **potrójnej nierówności podłoża**. Otrzymano następujące odcięte przekrojów charakterystycznych toru:

$$x = x_D = 3,12104 [m];$$

$$x_1 = x_E = 3,87896 [m]$$

$$\rightarrow x_D + x_E = \frac{l_p}{2} = 7,0 [m];$$

$$x_2 = x_F = 1,40435 [m];$$

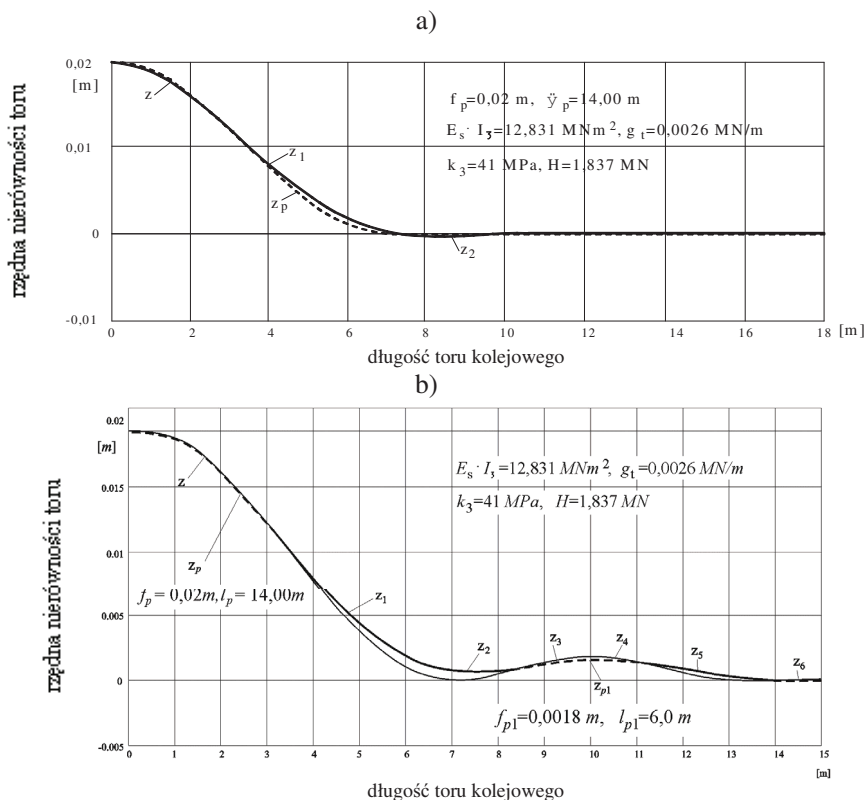
$$x_3 = x_G = 1,65415 [m];$$

$$x_4 = x_H = 1,18464 [m];$$

$$x_5 = x_I = 2,60686 [m].$$

Wyniki powyższych obliczeń przedstawiono na rys. 3.

Jak widać z rys. 3 przyjęte do obliczeń nierówności podłoża powodują zmianę podparcia toru. Pojedyncza nierówność podłoża powoduje, że **długość odcinka utraty kontaktu**



3. Linia ugięcia toru na lokalnych nierównościach podłoża [5]:

- a) pojedyncza nierówność podłoża:  $f_p=0,02$  m i  $l_p=14,0$  m (środkowa nierówność),  
 b) potrójna nierówność podłoża:  $f_p=0,02$  m i  $l_p=14,0$  m (środkowa nierówność)  
 oraz  $f_{p1}=0,0018$  m i  $l_{p1}=6,0$  m (boczne nierówności)

**toru z podłożem** wynosi 4,64 m. Natomiast w przypadku trzech nierówności podłoża następuje wzrost długości braku kontaktu toru z podłożem do wartości aż 5,283 m, co szczególnie niekorzystnie wpływa na jego pracę w płaszczyźnie poziomej w okresie wysokich temperatur. Ponadto deformujące się podłoże podsypkowe i tor kolejowy powoduje np. zaburzenia ruchu postępowego taboru kolejowego wskutek powstających nierówności. Podczas przejazdu koła przez obszar pionowej nierówności geometrycznej zaburzony zostaje ruch obrotowy koła, w rezultacie obniżający *trakcyjną efektywność koła* oraz wpływając na wydłużenie drogi środka koła [14]. Pojęcie *trakcyjnej efektywności koła* definiowane jest jako praktyczny stopień wykorzystania przyczepności, wynikającej z nacisków statycznych podczas eksploatacji [14]. Na podstawie teoretycznych obliczeń [14] stwierdzono, że przy prowadzeniu ruchu z prędkością wynoszącą 30 m/s (108 km/h) efektywność trakcyjna spada o 50 % w przypadku, gdy amplituda nierówności toru przekracza 7 mm [14] na długości 2 [m]. Ruch pociągu

po nierównościach występujących w torze może znacznie obniżyć efektywność napędu i hamowania. Zaburzenia obrotowego ruchu koła podczas jazdy po nierównościach toru przy ustalonej prędkości ruchu środka koła wzdłuż toru prostego pokazano na rys. 4 (szczegół A).

#### Wybrane imperfekcje powodujące zmianę warunków pracy elementów toru

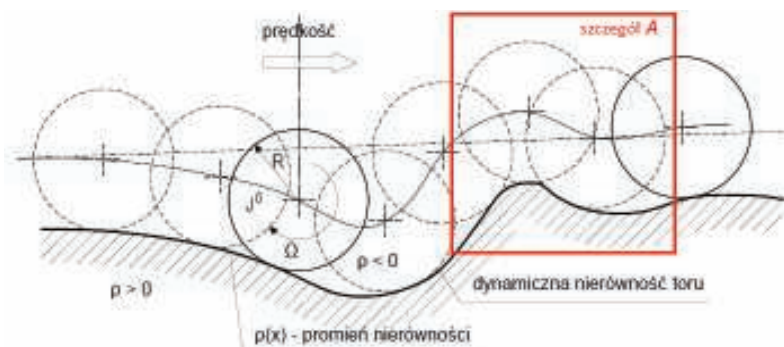
W rzeczywistym torze kolejowym dochodzi do powstawania różnych postaci zmian warunków jego pracy dla poszczególnych jego elementów. Zaliczamy do nich m.in.:

- tor jako belka przedziałami spoczywająca na podłożu [5,15],
- zmienna wartość ściskającej siły osiowej w torze kolejowym [5],
- zmienna sztywność elementu toru kolejowego na jego długości (np. podkładu) [5],
- zmienne wartości parametrów podłoża [5].

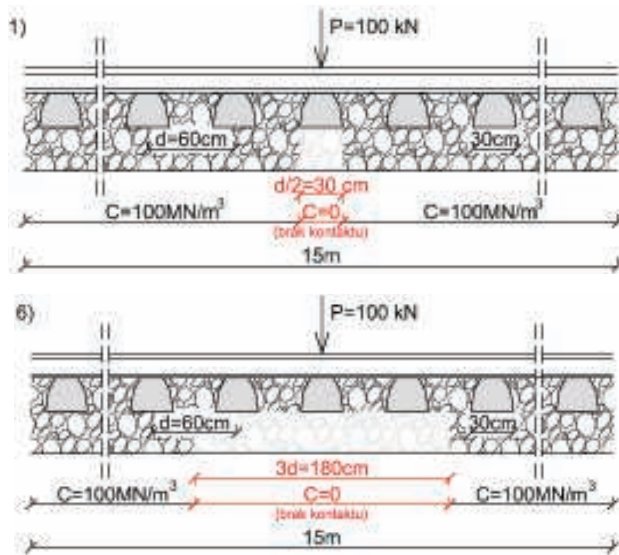
Spotykane zmiany sztywności podparcia wynikające np. z występowania w podłożu gruntów o zróżnicowanych właściwościach [1,11,17], grubości podsypki czy typu konstrukcji nawierzchni wpływają m.in. na dodatkowe ugięcia szyny. W celu określenia wpływu braku kontaktu toru z podłożem na takie ugięcia szyny, przeanalizowano metodą elementów skończonych [5,7] odcinek toru w bezpośredniej strefie obciążenia. Obliczenia przeprowadzono dla obciążenia skupionego  $P$  o wartości 100 [kN] przyłożonego w środku rozpiętości odcinka (na podstawie wykonanych analiz uznano ten przypadek za najniekorzystniejszy), obrazujące wpływ wydłużania strefy braku kontaktu na maksymalne ugięcia szyny.

Obliczenia przeprowadzono w celu zbadania zależności pomiędzy długością odcinka toru, na którym zachodzi zjawisko braku kontaktu pomiędzy podkładami a podsypką, a maksymalnymi ugięciami szyny. Do analizy wykorzystano 100 elementów schemat obliczeniowy, powodujący podział 15 [m] odcinka toru na elementy o długości 15 [cm]. Obliczenia przeprowadzono dla szyny 60E1, 49E1 oraz dla szyny porównawczej (o większej sztywności, np. szyna typu R75) obciążonej siłą skupioną w środku rozpiętości przyjmując następujące dane:

- $E = 210$  [GPa],



4. Zaburzenia obrotowego ruchu koła podczas jazdy po nierównościach toru wzdłuż toru prostego [14]



5. Przyjęte skrajne schematy obliczeniowe (brak kontaktu od  $d/2$  do  $3d$ , czyli od 30 [cm] do 180 [cm]) [22] (efekt tzw. wiszącego/wiszących podkładu/podkładów)

- $I_{60E1} = 3038,3 \cdot 10^{-8}$  [m<sup>4</sup>],  $I_{49E1} = 1816 \cdot 10^{-8}$  [m<sup>4</sup>] [16],  $I_{por} = 4597 \cdot 10^{-8}$  [m<sup>4</sup>] (np. szyna typu R75)
- $EI_{UIC60} = 6,38$  [MNm<sup>2</sup>],  $EI_{49E1} = 3,814$  [MNm<sup>2</sup>],  $EI_{por} = 9,65$  [MNm<sup>2</sup>]
- oraz siła skupiona  $P = 100$  [kN].

Brak kontaktu pomiędzy podkładami a podsypką został uwzględniony w obliczeniach jako przyjęcie na tym odcinku współczynnika podatności podłoża równego  $C = 0$  [MN/m<sup>3</sup>]. Na pozostałej części toru przyjęto stały współczynnik podatności podłoża [1,5,22]:

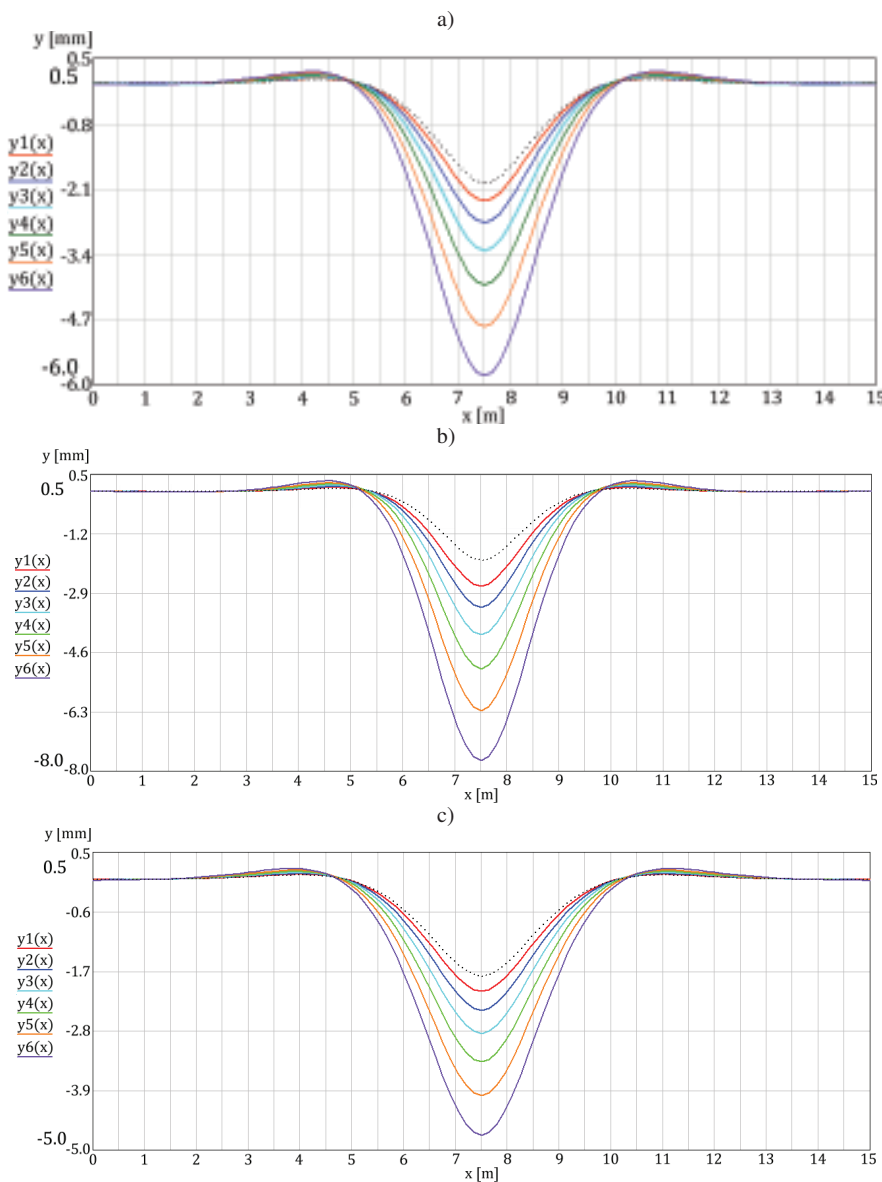
- $C = 100$  [MN/m<sup>3</sup>],
- oraz  $d$  - osiowy rozstaw podkładów (przyjęto 60 cm).

Obliczenia przeprowadzono dla 6 różnych długości strefy braku kontaktu, kolejno zwiększając długość braku kontaktu od wartości  $d/2$ , czyli 30 [cm] do wartości aż  $3 \cdot d$ , czyli 180 [cm], co pokazano na rys. 5.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń dla analizowanych szyn zestawiono w tabl. 1, a na rys. 6 przedstawiono porównanie maksymalnych ugięć dla analizowanych schematów obliczeniowych.

Na podstawie rys. 6 oraz zestawienia wyników maksymalnych ugięć zawartych w tabl. 1 stwierdzono, że długość strefy na której następuje brak kontaktu pomiędzy torem a podsypką ma znaczny wpływ na maksymalne ugięcia szyny.

Otrzymane wartości maksymalnych ugięć szyny porównawczej (zestawione w tabl. 1) są zarówno mniejsze od wyznaczonych ugięć dla szyny 49E1 oraz 60E1. Maksymalne ugięcia dla strefy braku kontaktu równej 180 cm wynosi 4,727 mm co stanowi ok. 61 % maksymalnego ugięcia szyny 49E1, oraz ok. 81 % maksymalnego ugięcia szyny 60E1. Wartość maksymalnego ugięcia w przypadku 180 cm strefy braku kontaktu jest większa aż o ok. 163 % od ugięć szyny na odcinku o jednolitej sztywności podłoża (które wynosi 1,794 mm). Na podstawie obliczeń pokazanych na rys. 6, stwierdzono, że maksymalne ugięcia szyny powstają dla nawierzchni z szyną 49E1. Sztywność szyny  $EI$  wpływa zatem bezpo-



6. Porównanie maksymalnych ugięć szyny

w zależności od długości strefy braku kontaktu dla analizowanych szyn [22]

a) szyna 60E1; b) szyna 49E1; c) szyna porównawcza

(oznaczenia jak w tabl. 1, wartość porównawcza dla schematu 0 oznaczona przerywaną linią)

średnio na powstające ugięcia szyny. Maksymalne ugięcia szyn, niezależnie od ich typów, wzrastają wraz z powiększaniem się strefy braku kontaktu pomiędzy torem a podsypką. Podczas analizy obliczeniowej wyznaczono także wartości dodatkowych ugięć szyn ( $y_d$ ), które powstają podczas wystąpienia miejsc w których utracony jest kontakt toru z podsypką. Ich wartości zestawiono w tabl. 2.

Największe dodatkowe ugięcia szyny odnotowano dla szyny 49E1. Zmiana szyny z 49E1 na szynę porównawczą pozwoli zmniejszyć dodatkowe ugięcia szyny w przypadku najdłuższej analizowanej strefy braku kontaktu o 46 %, natomiast zmiana na szynę typu 60E1 spowoduje ok. 30 % redukcję dodatkowych ugięć szyny.

Stąd do dalszej analizy przyjęto szynę typu 49E1. Na dodatkowe ugięcia szyny ma wpływ także zmienna wartość ściskającej siły osiowej w szynie bezстыkowego toru kolejowego.

Na rys. 7 pokazano przykładowe ugięcie długiego, bezстыkowego toru kolejowego z szynami 49E1 spoczywającego na sprężystym podłożu jedno- i dwuparametrowym, obliczone metodą elementów skończonych [5,7,22]. Założono brak kontaktu toru z podłożem w jego środkowej strefie na długości 4- $a$ , gdzie  $a$  jest rozstawem podkładów (przyjęto  $a=0,65$  m). Przyjęto następujące dane:

- tor z szynami typu 49E1,  $E \cdot I = 7,64$  MNm<sup>2</sup> (sztywność toru),
- $g_t = 0,0026$  MN/m (ciężar toru),
- $k_1^2 = 26,605$  MPa (współczynnik podłoża podsypkowego),
- $k_2^2 = 0$  MN (dla podłoża jedno-parametrowego),
- $k_2^2 = 2,6605$  MN (dla podłoża dwuparametrowego).

Na rys. 7 brak kontaktu toru z podłożem występuje na odcinku pomiędzy odcięciami 2,6 m a 5,2 m na długości toru kolejowego. Uwzględniono również wpływ ściskającej siły osiowej w torze. Przyjęto **cztery warianty** zmiany siły ściskającej:

- 1) brak siły podłużnej w torze,
- 2) siła na początku rozpatrywanego

**Tab. 1.** Wartości maksymalnych ugięć analizowanych szyn w zależności od długości strefy braku kontaktu

Nr schematu	Długość strefy braku kontaktu [cm]	Maksymalne ugięcia szyny porównawczej [mm]	Maksymalne ugięcia szyny 60E1 [mm]	Maksymalne ugięcia szyny 49E1 [mm]
0	0	1,794	1,987	2,262
1	30 (d/2)	2,070	2,329	2,714
2	60 (1*d)	2,419	2,773	3,319
3	90 (1,5*d)	2,850	3,332	4,098
4	120 (2*d)	3,373	4,018	5,074
5	150 (2,5*d)	3,996	4,845	6,268
6	180 (3*d)	4,727	5,826	7,703

**Tab. 2.** Wartości dodatkowych ugięć szyn  $y_d$  w zależności od ich typu i długości strefy braku kontaktu

Nr schematu	Długość strefy braku kontaktu [cm]	Dodatkowe ugięcia szyny [mm]		
		49E1	60E1	szyna porównawcza
0	0	0	0	0
1	30	0,452	0,342	0,276
2	60	1,057	0,786	0,625
3	90	1,836	1,345	1,056
4	120	2,812	2,031	1,579
5	150	4,006	2,858	2,202
6	180	5,441	3,839	2,933

**Tab. 3.** Wartości maksymalnych ugięć szyny (60E1)

w zależności od sztywności podparcia na odcinku sąsiadującym do strefy braku kontaktu

Nr schematu	Długość strefy braku kontaktu [cm]	Podatność podłoża na odcinku sąsiadującym [MN/m <sup>3</sup> ]	Długość odcinka zmiany [cm]	Ugięcia szyny [mm]
0	0	100	0	1,987
1	60	100	0	2,773
2	60	120	15	2,684
3	60	120	30	2,615
4	60	80	15	2,869
5	60	80	30	2,954

- 3) stała siła podłużna w torze o wartości 0,25 [MN], po czym ponownie wzrasta liniowo osiągając na końcu toru wartość 0,5 [MN],
- 4) siła na początku rozpatrywanego odcinka toru ma wartość 0,5 [MN], wzrasta liniowo na środku toru do wartości 0,75 [MN], po czym ponownie maleje liniowo na końcu toru do wartości 0,5 [MN].

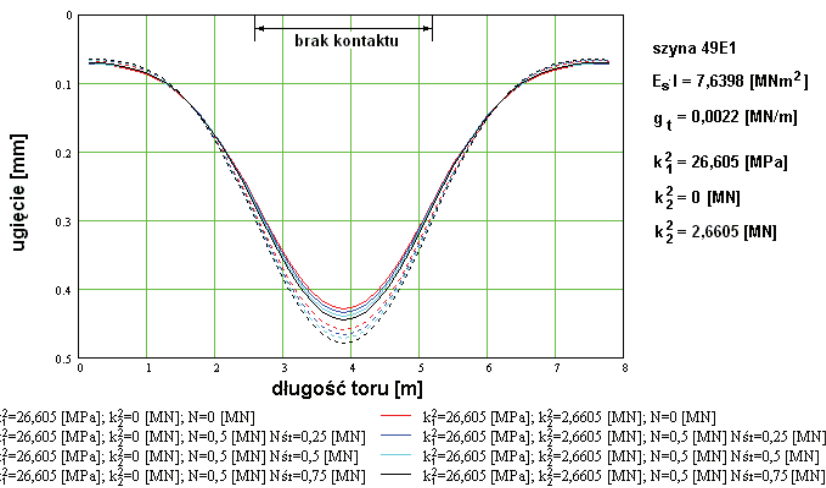
Jak widać na rys. 7 ugięcie toru jest większe w przypadku podłoża jednoparametrowego i wzrasta wraz ze zwiększaniem siły osiowej panującej w torze kolejowym. Największą wartość ugięcia uzyskano dla 4 wariantu zmiany siły podłużnej (przerwany kolor czarny). Podobnie dla toru na podłożu

dwuparametrowym: największą wartość ugięcia uzyskano dla 4 wariantu zmiany siły podłużnej (ciągły kolor czarny), co można tłumaczyć największą wartością siły ściskającej dla tego przypadku.

### Wpływ zmiany sztywności podparcia szyny w otoczeniu strefy braku kontaktu na ugięcia szyny

W rzeczywistym torze kolejowym w najbliższym otoczeniu strefy braku kontaktu dochodzi do zmiany sztywności podłoża. Zagadnienie wpływu lokalnej zmiany sztywności podparcia toru w bezpośrednim otoczeniu strefy braku kontaktu na ugięcia szyny wykonano dla szyny 60E1.

Do obliczeń przyjęto schemat (pokazany na rys. 8), w którym brak kontaktu pomiędzy torem a podsypką



7. Wycinek nieskończenie długiego toru bezstykowego z szynami 49E1, spoczywającego na sprężystym podłożu jedno- i dwuparametrowym w przypadku braku jego kontaktu z podłożem w środkowej strefie na długości 2,6 m (analiza numeryczna) [5]

następuje na długości  $d = 60$  [cm]. W obliczeniach przyjęto 2 przypadki lokalnej zmiany sztywności podparcia toru:

- zwiększenie podatności podłoża  $C$  ze  $100$  [MN/m<sup>3</sup>] do  $120$  [MN/m<sup>3</sup>],
- zmniejszenie podatności podłoża  $C$  ze  $100$  [MN/m<sup>3</sup>] do wartości  $C=80$  [MN/m<sup>3</sup>].

Przyjęto lokalną zmianę podatności podłoża zachodzącą na odcinku  $15$  [cm] oraz  $30$  [cm]. Schematy obliczeniowe przedstawiono na rys. 8.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono w tabl. 3 i pokazano na rys. 9.

Przeprowadzona analiza obliczeniowa lokalnej zmiany sztywności podparcia szyny na odcinku sąsiadującym do strefy braku kontaktu (rys. 9) pozwala stwierdzić, że:

- zwiększenie sztywności podparcia

na krótkim odcinku ( $15$  [cm]) pozwala na tylko  $3,2\%$  redukcję ugięć szyny,

- natomiast zwiększenie sztywności podparcia na długości  $30$  [cm] zmniejsza otrzymane ugięcia o  $5,7\%$ ,
- w przeciwnym przypadku, czyli zmniejszenia sztywności na długości  $15$  [cm] powoduje wzrost ugięć o  $3,5\%$ , podczas gdy zmniejszenie sztywności podparcia na  $30$  [cm] powoduje  $6,5\%$  wzrost ugięć szyny.

Jak widać z przeprowadzonych obliczeń wzrost sztywności podatności podłoża w obrębie obszaru braku kontaktu toru z podłożem, nie stanowi zatem wyraźnego źródła poprawy pracy toru kolejowego (powoduje tylko niewielkie zmniejszenie ugięcia szyny, rzędu kilku procent). Stąd szczególnie znaczenia nabierają zatem nowe,

eksperymentalne metody wykrywania uszkodzeń w szynie/torze, jak np. zastosowanie transformacji falkowej w wykrywaniu uszkodzeń w belkach ciągłych podpartych sprężystości [21].

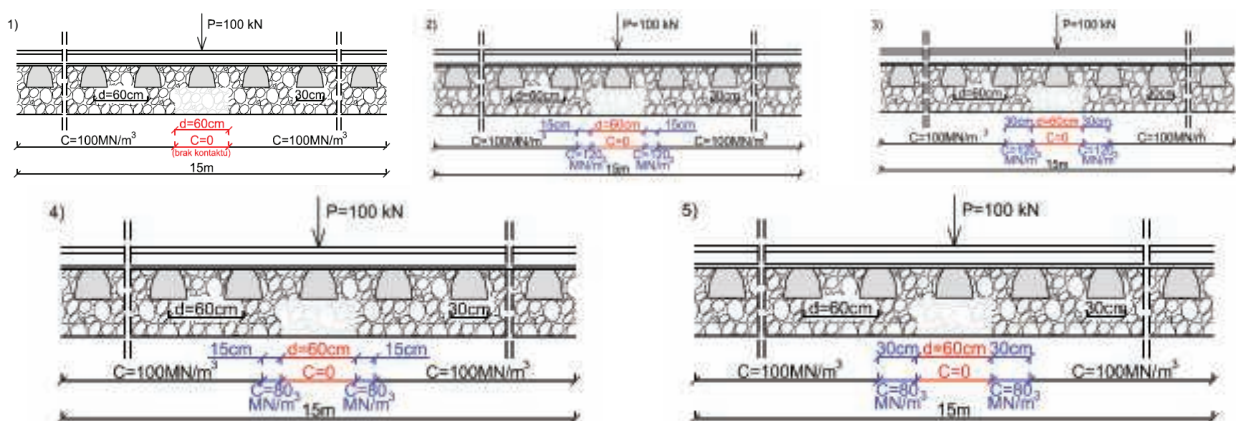
## Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że:

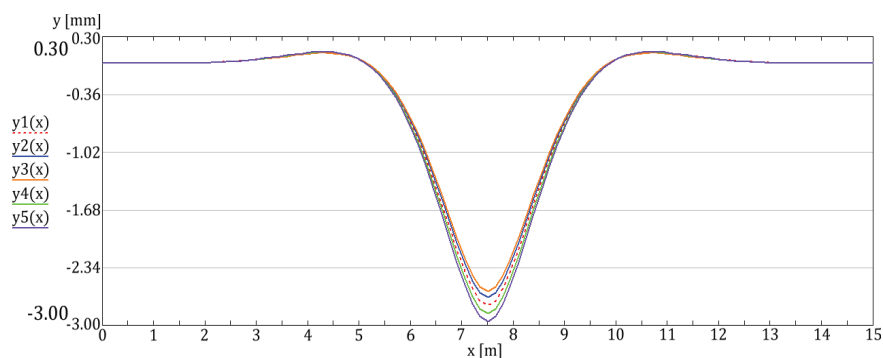
1. Przedstawiona analiza pokazuje zmianę warunków pracy szyny wskutek powstających imperfekcji w czasie eksploatacji bezstykowego toru kolejowego.

2. W przypadku spoczywania toru kolejowego na lokalnych nierównościach podłoża obserwujemy zmianę warunków podparcia toru. Przyjęta pojedyncza nierówność podłoża powoduje, że długość odcinka utraty kontaktu toru z podłożem wynosi  $4,64$  m (patrz rys. 3a). Natomiast w przypadku trzech nierówności podłoża następuje wzrost długości braku kontaktu toru z podłożem do wartości  $5,283$  m (rys. 3b), co szczególnie niekorzystnie wpływa na jego pracę w płaszczyźnie poziomej w okresie wysokich temperatur (osłabienie oporu porzecznego). Przedstawiona analiza obrazuje wpływ deformacji toru kolejowego na zwiększenie długości braku kontaktu toru z podłożem. Ponadto deformujące się podłoże podsypkowe i tor kolejowy powoduje np. zaburzenia ruchu postępowego taboru kolejowego wskutek powstających nierówności (rys. 4).

3. Analiza uzyskanych wartości dodatkowych ugięć szyn w zależności od ich typu i długości strefy braku kontaktu wskazała na korzystne znaczenie więk-



8. Schematy obliczeniowe lokalnej zmiany sztywności na odcinku sąsiadującym ze strefą braku kontaktu



9. Wykres maksymalnych ugięć szyny 60E1 w zależności od sztywności podparcia toru na odcinku sąsiadującym do strefy braku kontaktu o długości 60 [cm] [22] (oznaczenia jak w tabl. 3)

szej sztywności szyny w płaszczyźnie pionowej oraz zmniejszenie długości strefy braku kontaktu toru kolejowego.

4. Analiza wpływu zmiany siły ściskającej w szynie toru kolejowego (na rys. 6) pokazała, że ugięcie toru jest większe w przypadku podłoża jednoparametrowego i wzrasta wraz ze zwiększaniem siły osiowej panującej w torze kolejowym.

5. Analiza obliczeniowa lokalnej zmiany sztywności podparcia szyny na odcinku sąsiadującym do strefy braku kontaktu (rys. 9) pozwala stwierdzić, że wzrost sztywności na odcinkach sąsiadujących do długości braku kontaktu nie stanowi wyraźnego źródła poprawy pracy toru kolejowego (powoduje tylko niewielkie zmniejszenie ugięcia szyny, rzędu kilku procent). Ponadto zmniejszenie sztywności odcinków bezpośrednio otaczających strefę braku kontaktu występujące w rzeczywistym torze kolejowym wpływa dodatkowo na zwiększenie ugięć szyny. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Bałuch H.: Sposoby wyznaczania charakterystyk podłoża kolejowego. Problemy Kolejnictwa z. 39, Warszawa, WKiŁ 1967,
- [2] Bednarek Wł.: Local unevenness of lengthwise profile influence on stability conditions of continuous welded rail track. Foundations of Civil and Environmental Engineering, Poznań University of Technology, No. 10, 2007,
- [3] Bednarek Wł.: The analysis of the influence of variable roadbed stiffness and support of railway sleeper on its work. Foundations of Civil

- and Environmental Engineering (FCEE), Poznań University of Technology, No. 13, 2010,
- [4] Bednarek Wł.: Analiza wpływu podłoża i sposobu podparcia na pracę podkładu kolejowego. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej (Archives of Institute of Civil Engineering), Poznań University of Technology, 9/2011,
- [5] Bednarek Wł.: Wpływ pionowych odkształceń nawierzchni i podtorza na pracę toru bezстыkowego. Seria Rozprawy Nr 506, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013, ISSN 0551-6528,
- [6] Bednarek Wł.: Wybrane zagadnienia współpracy nawierzchni z podłożem podczas eksploatacji bezстыkowego toru kolejowego, Przegląd Komunikacyjny nr 10/2014,
- [7] Bednarek Wł.: Determination of foundation coefficients for a 2-parameter model on the basis of railway sleeper deflection. International Conference of Continuous Media with Microstructure II, Łagów, 2015
- [8] Bednarek Wł.: Zagadnienia powstających pionowych nierówności w eksploatowanym torze kolejowym, Przegląd Komunikacyjny 2/2016, rocznik LXXI,
- [9] Czyczuła Wł.: Wpływ niejednorodności podłoża szynowego na dodatkowe ugięcia szyny pod obciążeniem użytkowym, Drogi Kolejowe nr 5/1991,
- [10] Czyczuła Wł.: Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej. Monografie Politechniki Krakowskiej, nr 126, Kraków 1992,
- [11] Drozdziel J., Sowiński B., Szulczyk A.: Equivalent track stiffness determi-

- nation. International Virtual Journal for Science, Techniques and Innovations for Industry, 2011,
- [12] Huber M. T.: Pisma. Zagadnienia kolejowe. Tom III, dział VIII, PWN, Warszawa, 1957,
- [13] Lewandowski R., Świtka R.: Zginanie belek na sprężysto-plastycznym podłożu Winklera z więzami jednostronnymi. Archiwum Inżynierii Lądowej – Tom XXXIV, Z. 1/1988,
- [14] Madej J.: Teoria ruchu pojazdów szynowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004,
- [15] Mączka J., Szefer G.: Belka Timoshenki przedziałami spoczywająca na podłożu typu Wieghardta. Archiwum Inżynierii Lądowej, tom XVII, z. 1/1971,
- [16] PKP: Id-1 (D-1) Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych, Warszawa 2005 r. z późn. zmianami.
- [17] Siewczyński Ł.: Zagadnienia współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem gruntowym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy nr 66, Poznań, 1974,
- [18] Skrzyński E.: Wpływ dużego obciążenia ruchem oraz zwiększonych szybkości pociągów na pracę podtorza. Problemy Kolejnictwa, nr 67, Warszawa 1975,
- [19] Szumierz W.: Analiza utraty kontaktu prostego toru bezстыkowego z podłożem. Archiwum Inżynierii Lądowej, tom XIX, z. 2, 1973,
- [20] Szumierz W.: Wpływ odkształceń podłoża górniczego na pracę podkładu betonowego. Drogi Kolejowe nr 4/91,
- [21] Ziopaja K., Guminiak M.: Zastosowanie dyskretnej transformacji falkowej w wykrywaniu uszkodzeń w belkach ciągłych podpartych sprężycie. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, Poznań 2015,
- [22] Zydorek M.: Analiza wybranych zagadnień współpracy bezстыkowego toru kolejowego podczas znacznej zmiany jego kontaktu i podparcia z podłożem podsypkowym. Praca magisterska (pod kierunkiem Wł. Bednarka), Poznań 2016 (maszynopis).