

PROBLEMY OBLICZANIA WYTRZYMAŁOŚCI TORU W ŚWIETLE TECHNICZNYCH SPECYFIKACJI INTEROPERACYJNOŚCI 1299/2014

Juliusz Sołkowski

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd problemów związanych z obliczaniem wytrzymałości toru w związku z procesem uzyskiwania dopuszczenia do eksploatacji toru po modernizacji lub odnowieniu. Zaproponowano pewną metodę obliczeniową w kierunku pionowym. Zwrócono uwagę na niedostatki polskich przepisów PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. w zakresie zarówno teoretycznym, jak i praktycznym, dotyczącym wymagań dla toru, które mogłyby pomóc w wykonywaniu obliczeń.

Słowa kluczowe: nawierzchnie podsypkowe, wytrzymałość toru, techniczne specyfikacje interoperacyjności, parametry nawierzchni

1. Wstęp – cel pracy

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie zarysu obliczeń wytrzymałości toru w świetle TSI 1299/2014 [7]. Z uwagi na wielkość modernizacji na polskich liniach kolejowych, problem dopuszczenia do eksploatacji elementów podsystemu „infrastruktura” (także pozostałych podsystemów) jest szczególnie ważny. Biura projektowe są zobowiązane do przeprowadzania obliczeń wytrzymałości toru, które są ważnym składnikiem oceny projektu toru. Ocenę taką wykonują jednostki notyfikowane, w porozumieniu z Inwestorem, Urzędem Transportu Kolejowego oraz biurem projektowym.

Zgodnie z cytowanym rozporządzeniem wyróżnia się:

- modernizację, która oznacza wszelkie większe prace modyfikacyjne prowadzone w podsystemie lub jego części, poprawiające całkowite osiągi podsystemu,
- odnowienie, które oznacza wszelkie większe prace wymienne w podsystemie lub jego części, niezmieniające całkowitych osiągnięć podsystemu,
- wymianę w ramach utrzymania, która oznacza wymianę części na inne części o identycznych funkcjach i osiągnięciach w ramach utrzymania prewencyjnego lub naprawczego.

Powyższe rozróżnienie zostało zachowane w zasadzie w Ustawie o Transporcie Kolejowym [11] w Artykule 25k. W punkcie 4 w/w ustawy podawane są warunki wydawana tzw. „dopuszczenia do eksploatacji” (*Authorization for Placing in Service - APS*), wydawane przez prezesa UTK. *Nota bene*, samo pojęcie „osiągi podsystemu” nie jest ściśle zdefiniowane. W praktyce zatem, panuje przekonanie, że każdy zabieg modernizacyjny czy utrzymaniowy, nawet bez formalnego wymogu uzyskania APS, wykonany na torze, podnosi jego osiągi. W związku z tym prawie w każdym przypadku będzie potrzebne dopuszczenie do eksploatacji oraz obliczenia wytrzymałości toru.

Problemem praktycznym, z którym borykają się biura projektowe jest brak szczegółowych wskazań we wspomnianych TSI odnośnie samych modeli obliczeniowych, które należy zastosować oraz nawet samych kryteriów wytrzymałości toru. Jakie jest kryterium? Kiedy tor je spełnia? Z jakim współczynnikiem bezpieczeństwa? Tego TSI nie przedstawiają. Zagadnienia te są pozostawione całkowicie w gestii biur projektowych.

Ponadto, aby uczynić problem jeszcze bardziej złożonym, wymagania odnośnie przyjmowania wielkości obciążenia są sformułowane poprzez odniesienie do innych norm, w tym normy taborowej [6], której celem jest określenie warunków badania taboru. Natomiast, dla toru podane są jedynie wielkości obciążeń dynamicznych, jakie musi on przenieść, tak aby badania taboru były bezpieczne. Nie są to zatem w sensie ścisłym obciążenia mające na celu obliczenia wytrzymałości toru, a jedynie spodziewane oddziaływania na tor. Nie jest to „odpowiednik torowy” normy do obliczeń obiektów mostowych.

W nierniejszym artykule przedstawiono przykładowe modele obliczeniowe toru oraz zaproponowano kryteria wytrzymałościowe, które mogą być pomocne dla projektantów.

2. Szczegółowe wymagania odnośnie wytrzymałości toru w świetle TSI 1299/2014

W punkcie 4.2.6 omawianych TSI 1299, sformułowane są następujące wymagania:

– Wytrzymałość toru na obciążenia pionowe.

Projekt toru, łącznie z rozjazdami i skrzyżowaniami uwzględnia co najmniej następujące siły:

- a) nacisk osi wybrany zgodnie z pkt 4.2.1,
- b) maksymalne pionowe siły koła. Maksymalne siły koła dla określonych warunków badania są zdefiniowane w pkt 5.3.2.3 normy EN 14363:2016 [6];
- c) quasi-statyczne siły koła. Maksymalne quasi-statyczne siły koła dla określonych warunków badania są zdefiniowane w pkt 5.3.2.3 normy EN 14363:2016.

– **Wzdłużna wytrzymałość toru**

Siły obliczeniowe:

- a) tor, łącznie z rozjazdami i skrzyżowaniami, projektuje się w taki sposób, aby wytrzymał siły wzdłużne równoważne siłom powstającym na skutek hamowania $2,5 \text{ m/s}^2$,
- b) zgodność z układami hamulcowymi
 - a. Tor, łącznie z rozjazdami i skrzyżowaniami, projektuje się w taki sposób, by możliwe było wykorzystanie magnetycznych układów hamulcowych w przypadku hamowania awaryjnego.
 - b. Wymagania projektowe dla torów, łącznie z rozjazdami i skrzyżowaniami, które są zgodne z wykorzystaniem układów hamulcowych wiroprowadowych, stanowią punkt otwarty.

– **Poprzeczna wytrzymałość toru.**

Projekt toru, łącznie z rozjazdami i skrzyżowaniami, uwzględnia co najmniej następujące siły:

- a) siły poprzeczne; maksymalne siły poprzeczne wywierane przez zestaw kołowy na tor dla określonych warunków badania są zdefiniowane w pkt 5.3.2.2 normy EN 14363:2016;
- b) quasi-statyczne siły prowadzące; maksymalne quasi-statyczne siły prowadzące Y_{qst} dla określonych promieni i warunków badania są zdefiniowane w pkt 5.3.2.3 normy EN 14363:2016.

Przepisy TSI 1299 przewidują także „Domniemanie zgodności w fazie projektowania” (pkt. 6.2.) dzięki rozróżnieniu tzw. „nowego projektu (konstrukcji) toru” oraz „istniejącego projektu (konstrukcji) toru”. Ten długi przypadek mam miejsce, gdy spełnione są oba następujące warunki:

- a) projekt toru znajdował się w normalnej eksploatacji przez co najmniej jeden rok,
- b) łączny tonaż na torze wynosił co najmniej 20 mln ton brutto w okresie normalnej eksploatacji.

W takiej sytuacji, tor można uznać za spełniający wymagania wytrzymałości, jeżeli nie planowane są żadne zmiany w jego użytkowaniu. Gdyby różnice wystąpiły, należy wykonać symulację komputerową wpływu symulacji różnic, co sprowadza się do wykonania obliczeń wytrzymałości jak dla toru nowego. TSI wymieniają następujące warunki eksploatacyjne, których zachowanie jest konieczne aby projekt toru (konstrukcji) nie był uznany za nowy:

- a) maksymalny nacisk osi,
- b) maksymalna prędkość na linii,
- c) minimalny promień łuku poziomego,
- d) maksymalna przechyłka,
- e) maksymalny niedobór przechyłki.

3. Modelowanie nawierzchni kolejowych

Generalnie, modelowanie toru kolejowego jest zagadnieniem trudnym i posiada bardzo bogatą literaturę. Zagadnieniem praktycznym dla bura projektowego jest właściwie wybór jednego ze znanych modeli obliczeniowych oraz przeprowadzenie obliczeń tak, aby zachować pewien założony współczynnik bezpieczeństwa (który, jak wspomniano, nie jest wyraźnie określony w TSI).

Poniżej przedstawiono klasyczny model toru kolejowego z wykorzystaniem liniowej teorii belki na podłożu lepko-sprężystym typu Winklera [2,3,4,5] z wykorzystaniem modelu Ahlbecka dotyczącym podsypki [1].

Przyjęto, że kryterium wytrzymałości toru w każdym z wymienionych kierunków oddziaływania (pionowym, wzdłużnym i poprzecznym) jest **nieprzekroczenie przemieszczeń granicznych w układzie, odpowiadających odpowiedzi toru o charakterystyce liniowej**. Innymi słowy, sprawdza się czy tor wraz ze wszystkimi jego elementami (szczególnie podsypką) pracują w zakresie liniowo-sprężystym, co oznacza:

- w przypadku podsypki: nieprzekroczenie dopuszczalnych przemieszczeń pionowych, poprzecznych oraz wzdłużnych,
- w przypadku przytwierdzeń: nieprzekroczenie dopuszczalnych przemieszczeń wzdłużnych w zakresie liniowo-sprężystym, nieprzekroczenie dopuszczalnych naprężeń w przytwierdzeniu w kierunku pionowym i poprzecznym,
- w przypadku podkładów: nieprzekroczenie dopuszczalnych naprężeń na podsypkę (z domniemaniem, że siły wewnętrzne w podkładzie nie przekraczają dopuszczalnych poziomów, jeżeli podkład jest zastosowany zgodnie z dopuszczeniem),
- w przypadku szyn: nieprzekroczenie dopuszczalnych naprężeń w przekroju szyny oraz dopuszczalnych wartości sił wzdłużnych z uwagi na stateczność toru.

Z uwagi na obszerność zagadnienia, poniżej przedstawiony jest przykładowy model toru oraz schemat obliczeń wytrzymałości toru jedynie w kierunku pionowym. Jest to model uwzględniający obciążenie dynamiczne, poruszające się po torze oraz biorący pod uwagę dynamiczne parametry toru.

3.1. Równanie równowagi

Podstawowym elementem modelu jest przyjęcie, że szyna jest belką (jest to tzw. belka Bernoulliego-Eulera) na podłożu sprężystym typu Winklera, z założeniem jednorodnego rozkładu naprężeń pod podkładami, dzięki czemu wprowadzono jednorodne parametry podparcia (założenie Zimmermanna). Podłoże belki wykazuje tłumienie wiskotyczne. Równanie dynamiczne toru jest następujące:

$$EI \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + U \cdot w(x,t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot \delta(x_i - vt) + q \cdot H(x_k, x_l) \quad (1)$$

gdzie:

$w(x,t)$ - ugięcie belki (szyny),

EI - sztywność zginania belki,

E - moduł Younga stali szynowej,

I - moment bezwładności pojedynczej szyny,

m - jednostkowa masa belki,

$c = 2m\omega_b$ - współczynnik tłumienia wiskotycznego podłoża belki, w którym ω_b - częstość kołowa drgań własnych belki,

Y - współczynnik podłoża szyny – wyznaczony dwoma metodami poniżej.

v - prędkość poruszającej się siły,

δ - delta Diraca,

q - obciążenie ciągłe na tor,

$H(x_k, x_l)$ - funkcja Heavisida dla obciążenia ciągłego o zakresie x_k, x_l ,

$P_i(t)$ - siła poruszająca się wzdłuż belki (n - liczba sił): przyjęto wartość stałą ze współczynnikiem dynamicznym:

$$P_i(t) = P_{char}^i \cdot \psi \quad (2)$$

gdzie:

P_{char}^i - i -ta wartość charakterystyczna (statyczna) siły pionowej, przypadającej na jeden tok szynowy, określona jako:

$$P_{char}^i = \frac{1}{2} Q_{vk} \quad (3)$$

gdzie:

Q_{vk} - jest obciążeniem charakterystycznym jedną osią pojazdu szynowego.

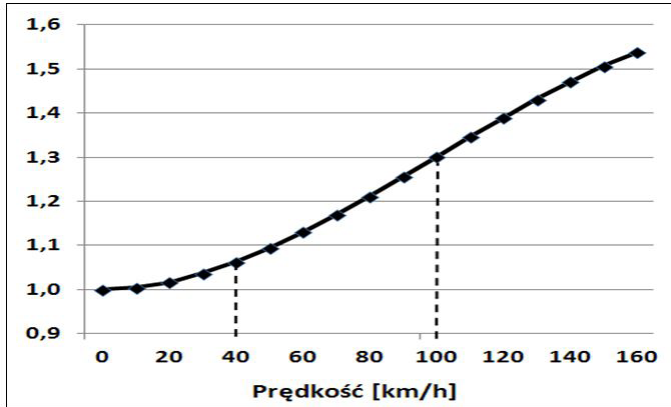
ψ - współczynnik dynamiczny, z braku innych wskazań dla toru w TSI, przyjęto wg Shrammana (rys. 1):

$$\psi = 1 + 4.5 \frac{v^2}{10^5} - 1.5 \frac{v^3}{10^7} \quad (4)$$

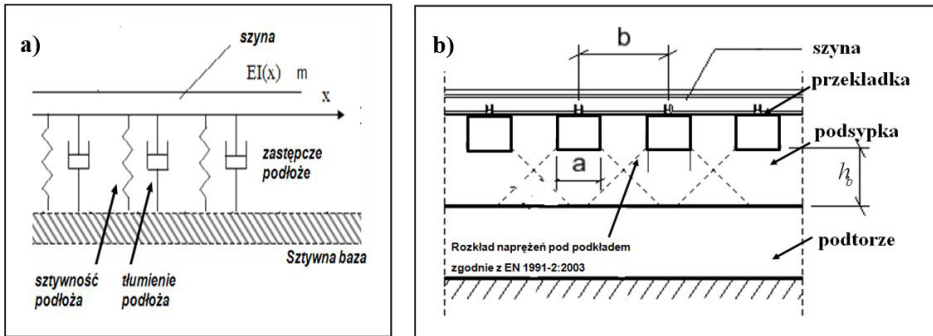
gdzie: v - prędkość w $[km/h]$.

Dodatkowo założono:

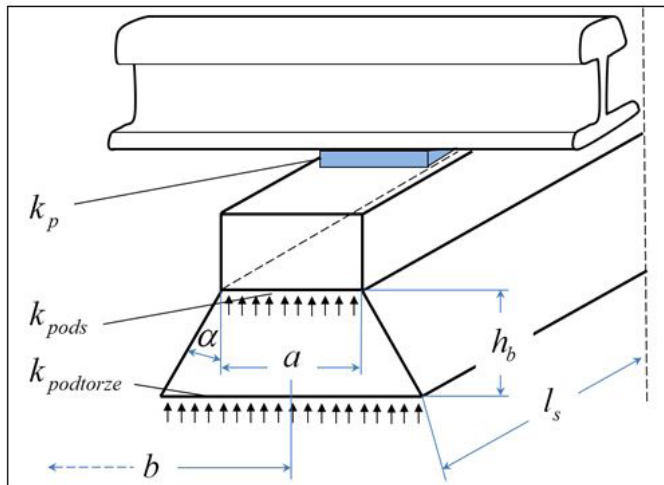
- symetrię konstrukcyjną względem osi podłużnej toru,
- nie brano pod uwagę zmiany sztywności materiałów w wyniku drgań szyny (brak usztywnienia dynamicznego),
- uwzględniono pewien zakres zmienności podłoża szyny, który odpowiada złemu, dobremu i bardzo dobremu stanowi utrzymania (por. tab. 1),
- sztywność podłoża szyny została wyznaczona dwoma metodami (rys. 2):
 - a) Metoda 1: uwzględniono jedynie zastępczy współczynnik podłoża,
 - b) Metoda 2: sztywność podłoża szyny wyznaczono z modelu wielowarstwowego, obejmującego przekładkę w przytwierdzeniu, podsypkę i podłoże ziemne (rys. 2, rys. 3).



Rys. 1. Zależność współczynnika dynamicznego od prędkości - wzór (4)



Rys. 2. Wyznaczenie sztywności podłoża: a) Metoda 1 (podłoże zastępcze), b) Metoda 2 (uwzględnienie sztywności przekładki, podsypki i podtorza)



Rys. 3. Przenoszenie obciążeń w modelu wielowarstwowym: długość podkładu (l), rozstaw podkładów (b), średnia szerokość podkładu (a), grubość podsypki (h_b), kąt tarcia wewnętrznej (α): k_p - sztywność przekładki, k_{pods} - sztywność pryzmy podsypki, $k_{podtorze}$ - sztywność podtorza pod pryzmą podsypki

3.2. Układ sztywności warstw

Proponowany model obliczeniowy toru składa się z trzech „warstw”: przekładki podszykowej (przytwierdzenia), podsypki oraz podtorza. Podkład jest traktowany jako sztywny. Mamy zatem następujące sztywności występujące w układzie:

1. Sztywność przekładki podszykowej: k_p [kN/mm].
2. Sztywność posadowienia podkładu w podsypce [3]:

$$k_{pods} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{1}{2} l_s - a \right) \cdot E_{pods}}{\ln \left[\frac{\frac{1}{2} l_s \cdot (a + 2 \operatorname{tg} \alpha \cdot h_b)}{a \cdot \left(\frac{1}{2} l_s + 2 \operatorname{tg} \alpha \cdot h_b \right)} \right]} \left[\frac{kN}{mm} \right] \quad (5)$$

gdzie:

α - kąt tarcia wewnętrzznego (tłuczeń) – rys. 3,

E_{pods} - moduł Younga podsypki – tab. 3.

Pozostałe oznaczenia – rys. 2-3.

3. Sztywność podtorza [3]:

$$k_{podtorze} = C \left(\frac{1}{2} l_s + 2 \operatorname{tg} \alpha \cdot h_b \right) \cdot (a + 2 \operatorname{tg} \alpha \cdot h_b) \left[\frac{kN}{mm} \right] \quad (6)$$

gdzie:

C - współczynnik podłoża – tab. 2, oznaczenia – rys. 2-3. Związek z modułem odkształcenia podtorza E_2 [11]:

$$C = \frac{E_2}{B(1 - \nu^2) \omega} \quad (7)$$

Dla współczynnika Poissona $\nu = 0.25$ („średni” grunt) oraz dla współczynnika dla płyty prostokątnej (np. podkład) $\omega = 0.84$ i szerokości podłoża zastępczego $B = 0.60$ m, otrzymuje się przykładowo dla modułu odkształcenia $E = 100$ MPa wartość $C = 254$ MN/m³. Sztywność pionowa (odpowiadająca węzłowi przytwierdzenia) całego układu k wyznaczona jest z równania:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_{pods}} + \frac{1}{k_{podtorze}} \quad (8)$$

4. Obliczenie współczynnika podłoża szyny:

$$U = \frac{k}{b} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

gdzie:

k - sztywność pionowa odpowiadająca węzłowi przytwierdzenia – wzór (8)

b - rozstaw podkładów – rys. 3.

Tłumienie nawierzchni

Tłumienie nawierzchni jest wyrażone poprzez tzw. współczynnik tłumienia $c = 2m\omega_b$ (por. opisy pod wzorem (1)). Z uwagi na brak ścisłych danych dotyczących tego współczynnika jest on przyjęty na podstawie literatury. Wartości zostały zestawione poniżej w tab. 1.

Tabela 1. Porównanie współczynników tłumienia nawierzchni podsypkowych

Źródło	Szywność podłoża	Wartości współczynników tłumienia
	$C[MN/m^3]$	$c = 2m\omega_b [kN s/m/mb]$
Kisilowski [10]	200 podkłady drewniane	30-70
Birmann [8]	b.d.	320
Czyczula [9]	podkłady drewniane	150
	podkłady strunobetonowe	60

Masa nawierzchni

Masa nawierzchni (m), która faktycznie uczestniczy w drganiach składa się z masy szyn oraz podkładów oraz tzw. „masy stowarzyszonej” podłoża. W modelach belkowych (wzór (1)) zależy ona od sztywności podłoża C i częstotliwości drgań belki f . Przykładowe wartości podano poniżej w tab. 2.

Tabela 2. Masy zastępcze nawierzchni – 1/2 toru (szyny 60E1)

Nawierzchnia	Podłoże	Wagony		Lokomotywa	
	$C[MN/m^3]$	$f [Hz]$	$m [kg]$	$f [Hz]$	$m [kg]$
Podkłady drewniane	50 ($c_k = 200 \text{ m/s}$) (*)	22	1236	20	920
	50 ($c_k = 400 \text{ m/s}$) (*)	27	743	21	931
	100	33	900	27	756
	200	54	385	37	677
Podkłady strunobetonowe	100	28	1293	23	686
	200	41	918	32	163
	300	49	834	-	-

(*) c_k - prędkość fal odkształcenia powierzchniowego

3.3. Obliczenie sił i naprężeń

1. Siła przypadająca na przytwierdzenie pod jedną szyną:

$$R = U \cdot w \cdot b \quad [kN] \quad (10)$$

gdzie:

U - współczynnik podłoża szyny – wzór (9)

w - ugięcie szyny,

b - rozstaw podkładów – rys. 2b-3.

2. Naprężenie pod podkładką:

$$\sigma_{pd} = \frac{R}{F_{pd}} \quad [MPa] \quad (11)$$

gdzie:

F_{pd} - powierzchnia podkładki żebrowej. Naprężenie pod podkładką jest maksymalnym naprężeniem w podkładzie na docisk.

3. Naprężenie pod podkładem:

$$\sigma_p = \frac{R}{2F_p} \quad [kPa] \quad (12)$$

gdzie:

F_p - powierzchnia podkładu.

4. Naprężenie na podtorze:

$$\sigma_{pod} = \frac{R}{\left(\frac{1}{2}l_s + 2tg\alpha \cdot h_b\right) \cdot (a + 2tg\alpha \cdot h_b)} \quad [kPa] \quad (13)$$

Oznaczenia podano na rys. 2,3 oraz pod wzorem (7).

5. Naprężenie w podkładce żebrowej:

$$\sigma_p = \frac{R}{F_{prztyw}} \quad [MPa] \quad (14)$$

gdzie: F_{prztyw} - powierzchnia docisku szyny do podkładki żebrowej.

4. Przykład obliczenia

Szyny: 60E1: $EI=6,38 \text{ MN}\cdot\text{m}^2$, szerokość stopki $b_s=150\text{mm}$

Przytwierdzenia: SB-4 (lub SB-7)

Przekładka PKW 60: sztywność statyczna przekładki $k_p = 60 \text{ kN/mm}$ [6]

Sztywność dynamiczna $k_p = 100 \text{ kN/mm}$ [6]

Podkłady: PS-94:

długość $l_s = 2.6 \text{ m}$, średnia szerokość $a = 0.27 \text{ m}$, rozstaw $b = 0.6 \text{ m}$

Podsypka:

Przyjęto trzy stany podsypki odpowiadające różnym okresom eksploatacji. Dane zawiera tab. 3. Grubość warstwy podsypki $h_b = 0.35 \text{ m}$. Tłuczeń klasa I, gat. 1.

Tabela 3. Kąt tarcia wewnętrzznego 4:1 (EN 1991-2:2003) i moduł Younga (Savidis {4})

Stan podsyпки	Kąt tarcia wewnętrzznego α [deg]	Moduł Younga [MPa]
Zły	14	180
Średni	14	209
Dobry	14	220

Podłoże szyny (podtorze):

Tabela 4. Współczynnik podatności podłoża

Stan podłoża	C [kN/m ³]
Zły	25000
Średni	50000
Dobry	75000

Analizowano dwa przypadki obliczeniowe:

Metoda 1: wyznaczenie szerokości belki zastępczej:

$$b_z = \frac{F_p}{2b} = \frac{0.26 \cdot 2.6}{2 \cdot 0.6} = 0.56 \text{ m} \quad (15)$$

gdzie: F_p - całkowita powierzchnia oparcia podkładu.

Metoda 2: wyznaczenie współczynnika sztywności układu k z wzoru (8).

Tabela 5. Obliczone współczynniki podłoża szyny (na jeden tok szynowy)

Współczynnik podłoża (ogólny) C [kN/m ³]	Metoda 1 $U = C \cdot b_z$ [MPa]	k z wzoru (8) [kN/mm]	Metoda 2 (*) $U = k/b$ [MPa]
25000	14.08	14.98	24.96
50000	28.17	25.76	42.93
75000	42.25	33.90	56.51

(*) rozstaw podkładów $b = 0.6$ m

Współczynnik tłumienia:

Przyjęto wartość jak dla podkładów strunobetonowych $c = 60 \text{ kNs/m/mb}$ (tab. 1)

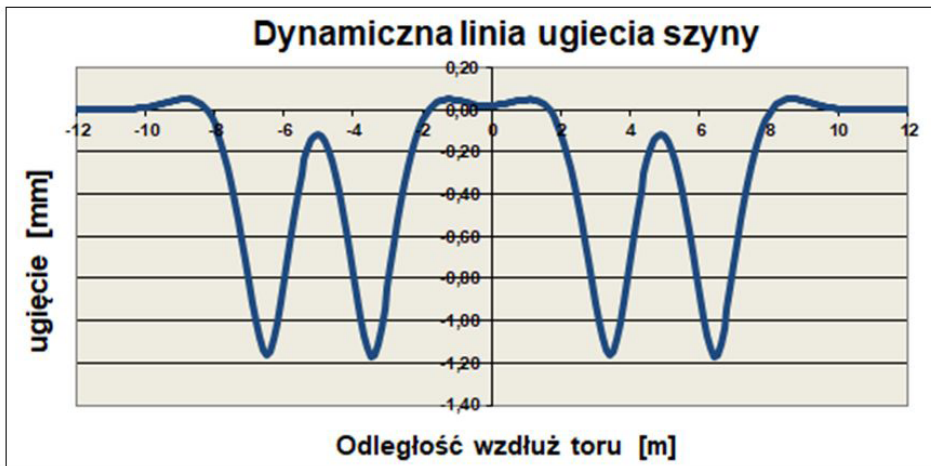
Masa belki torowej (masa szyny, masa 1/2 podkładu PS-94 oraz „masa stowarzyszona”):

Przyjęto: $60 \text{ kg} + 160 \text{ kg}/0.6 \text{ m} + 200 \text{ kg/mb} \approx 530 \text{ kg/mb}$

W tabeli 6, przedstawiono wyniki obliczeń ugięć szyny, reakcji oraz naprężeń w analizowanym torze. Natomiast na rys. 4 przedstawiono linię ugięcia szyny.

Tabela 6. Wyniki obliczeń zaproponowaną metodą w kierunku pionowym

Pojazd Husarz		Typ nawierzchni	Podsypkowa
Predkosc maksymalna	200,0 km/h	60E1	SB-4 PKW 60
Predkosc obliczeniowa	160,0 km/h	PS-94	podsyпка [cm]
Nasiok statyczny osi	225,0 kN	--	30
Nacisk dynamiczny osi	313,5	--	stan dobry
Wsp. dynamiczny	1,39	Ev2 [Mpa]=	120,00
Parametry toru	jednostki	statyczne	dynamiczne
Sztynność podtorza i toru (1/2 toru)	kN/mm	115,18	132,37
Porównanie sztywności	%	100	100
Sztynność podparcia jednego węzła	kN/mm	45,32	54,56
Sztynność podłoża szyny na 1mb	MN/m ²	75,54	90,93
Ugięcie szyny	mm	0,95	1,17
Porównanie ugięć	%	100	100
Ugięcie podtorza	mm	0,24	0,36
Reakcja podłoża szyny	kN	42,94	63,70
maksymalne naprężenie w szynie	MPa	55,72	78,88
Średnie naprężenie w przekładce	MPa	1,79	2,65
Średnie naprężenie pod podkładem	kPa	126,21	187,23
Średnie naprężenie na podtorze	kPa	58,06	86,14



Rys. 4. Linia ugięcia szyny z uwzględnieniem tłumienia nawierzchni, bez uwzględnienia drgań wyższych częstotliwości

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono bieżące problemy obliczania wytrzymałości toru z punktu widzenia wymagań TSI 1299/2014. Zaproponowano prosty model obliczeniowy w kierunku pionowym. Generalnie jednak problem jest dość złożony (np. [4]) i wymaga napisania specjalnego oprogramowania, aby w sposób jednolity obliczać wytrzymałość toru z wymaganym współczynnikiem bezpieczeństwa.

Ponadto należy wziąć pod uwagę, że konkretne sztywności dynamiczne elementów nawierzchni zależą od prędkości poruszającego się pociągu. Wynika to z faktu usztywnienia elementów nawierzchni w wyniku obciążenia przykładanego szybko.

Problemem praktycznym jest brak ścisłych wytycznych do modelowania nawierzchni oraz przyjmowania ich parametrów – przykładowo sztywności i masy podsypki. Zdaniem autora problem ten powinien być uregulowany przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Bibliografia

- [1] Ahlbeck D.R., Meachan H.C., Prause R.H., The development of analytical models for railroad track dynamics, in Kerr. A.D. (ed.) Railroad track mechanics and technology, Princeton University, New Jersey, 1975.
- [2] Kerr A. D., On the determination of the rail support modulus k , International Journal of Solids and Structures 37 (2000) 4335-4351.
- [3] Müller-Boruttau, Zur Dimensionierung Elastischer Elemente des Oberbaus, IMB Dynamik, 2010.
- [4] Savidis S., Bode C., Hirschauer R. & Hornig J., Dynamic soil-structure interaction with partial uplift, Structural Dynamics - EURODYM', Fryba & Naprstek (eds) 1999 Balkema, Rotterdam.
- [5] Szcześniak W., Statyka, dynamika i stateczność nawierzchni i podtorza kolejowego, przegląd podstawowych pozycji literatury, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej Budownictwo, z. 129, 1995, 1-220.
- [6] PN-EN 14363:2016-04 Kolejnictwo - Badania i symulacje modelowe właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu -- Badania właściwości biegowych i próby stacjonarne.
- [7] ROZPORZĄDZENIE KOMISJI (UE) NR 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej.
- [8] Birman F., Recent investigations in the dynamic modulus of elasticity of the track in ballast with regard to high speeds, in Kerr. A.D. (ed.) Railroad track mechanics and technology, Princeton Univ., New Jersey 1975.
- [9] Czychuła W., Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej, Monografia 126, Politechnika Krakowska, Kraków 1992.
- [10] Kisilowski J. (redakcja), Dynamika układu mechanicznego pojazd szynowy-tor, PWN, Warszawa, 1991.
- [11] Ustawa o Transporcie Kolejowym – tekst ujednolicony Dz.U. 2016, poz. 1727.