

ANALIZA NIEJEDNORODNOŚCI MECHANICZNYCH NAWIERZCHNI I PODTORZA W OBRĘBIE OBIEKTU MOSTOWEGO¹

Juliusz Sołkowski

dr hab. 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 modelowania niejednorodności nawierzchni i podtorza w strefie przejściowej oraz przedstawiono podsumowanie badań literatury w zakresie tzw. efektu progowego. Do obliczeń wykorzystano dwa modele obliczeniowe i porównano wyniki, które wskazują na dobrą zbieżność. W wyniku analiz oraz przeglądu literatury zaproponowano podział efektu progowego na tzw. pierwotny oraz wtórny. Wskazano, że obecnie stosowane zabiegi w strefie przejściowej są niewystarczające, gdyż nie redukują one pewnych zjawisk na styku różnych nawierzchni, a jedynie zmniejszają skutki niekorzystnych oddziaływań.

Słowa kluczowe: nawierzchnie podsypkowe, obiekty mostowe, nawierzchnie bezpodsypkowe, strefa przejściowa, efekt progowy

1. Wstęp – cel pracy

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników badań tzw. efektu progowego w nawierzchniach szynowych, który pojawia się w obrębie obiektów mostowych. Autorzy przedstawiają przykłady modelowania zjawiska oraz zestawiają przegląd literatury, który jest bardzo obszerny. Łącznie przeanalizowano około 300 publikacji – przykładowo [1,4,5,8,11], które są podsumowane w [13]. Badania nad tym problemem zapoczątkowane zostały już w latach 80-tych XX w. [7].

W wyniku analiz własnych oraz przeglądu istniejących badań sformułowana została teza o konieczności uzupełnienia konstrukcji nawierzchni i podtorza w strefie przejściowej o element wzmacniający cały układ nośny nawierzchni na zginanie.

2. Źródła niejednorodności nawierzchni i podtorza

Zgodnie z istniejącą tradycją inżynierską oraz zgodnie z poglądami wyrażanymi w wielu opracowaniach naukowych (np. [6,9]), problem efektu progowego jest

1 Wkład autorów w publikację: Sołkowski J. 80%, Kudła D. 20%

postrzegany przez pryzmat różnicy sztywności pomiędzy układami nawierzchnia-podłoże. Uważa się, że różnica sztywności nawierzchni, względnie układu nawierzchnia-podłoże jest źródłem nadmiernych oddziaływań dynamicznych pojazdów-nawierzchnia, które prowadzą do ogólnej degradacji nawierzchni. Jest to jednak niepełne rozumienie problemu, gdyż oprócz sztywności podparcia (tzn. podsypki i podtorza), występują różnice w sztywności zginania układu torowego, masie toru oraz właściwości tłumiących toru i jego podłoża.

Jednakże w praktyce pomija się te parametry. Projektując rozwiązania w strefach przejściowych przed obiektami mostowymi dąży się jedynie do utworzenia *rampy* o sztywności wzrastającej w kierunku obiektu poprzez stopniowe wzmocnianie i usztywnianie zarówno nawierzchni jak i podtorza [2,3,10]. Równocześnie mogą być stosowane zabiegi, których celem jest zmniejszenie sztywności nawierzchni na obiekcie, np. poprzez zastosowanie bardziej podatnych przekładek podszynowych.

Pojawia się praktyczne pytanie: jaki udział w całkowitej sztywności układu nawierzchnia-podłoże mają jego poszczególne elementy? Zgodnie z kartą UIC 719R [15] dla dobrze utrzymanego podtorza stosunek sztywności można oszacować następująco:

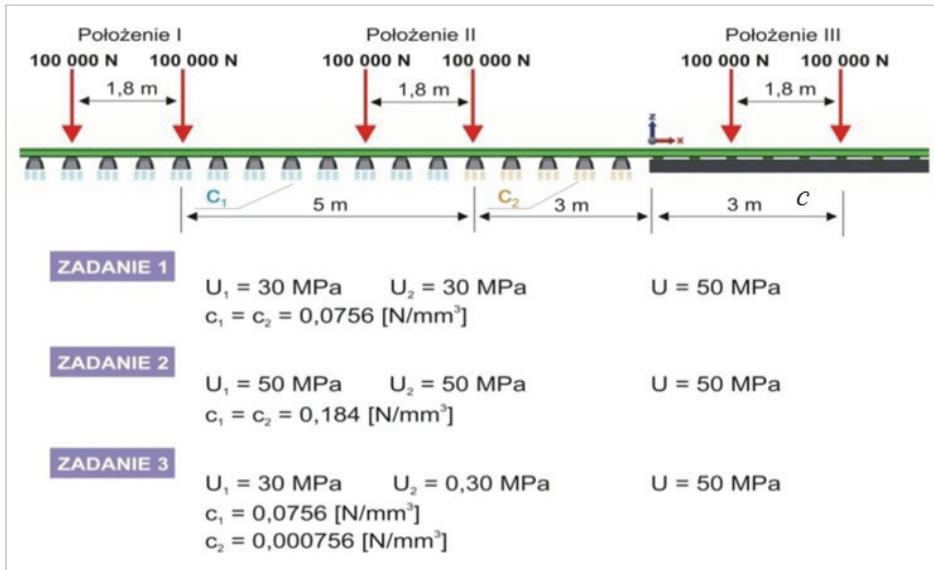
- nawierzchnia odpowiada za około 80-90% sztywności (tzn. 80-90% ugięcia sprężystego odbywa się w zakresie nawierzchni – około 1.5-2.0 mm),
- podtorze odpowiada za około 10-20% sztywności (tzn. do 20% ugięcia sprężystego odbywa się w zakresie podtorza - około 0.1-0.3 mm).

Pewne rozwiązania w podtorzu są zaproponowane w załączniku nr 17 (nienormatywnym) instrukcji Id-3 [16]. Natomiast Rozporządzenie [14] wraz z nowelizacją z 2014 r. postuluje zastosowanie rozwiązań zmniejszających osiadania. Długość strefy przejściowej zwykle przyjmuje się jako 20 m.

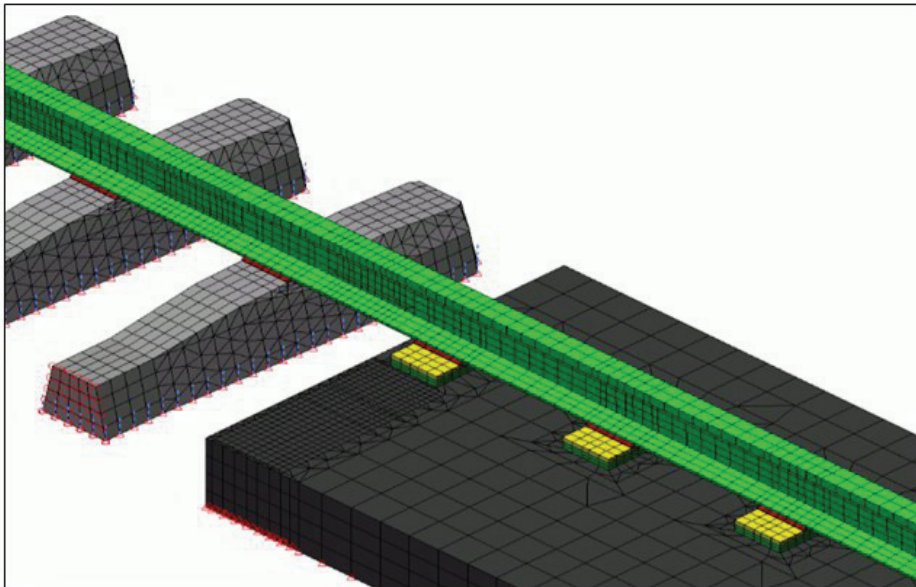
3. Modelowanie niejednorodności układu nawierzchnia-podtorze

Poniżej przedstawiono kilka przypadków modelowania strefy przejściowej z wykorzystaniem dwóch modeli obliczeniowych: metody Elementów Skończonych (rys. 1,2) oraz Metody Różnic Skończonych. Ta ostatnia została wyczerpująco opisana w [12,13]. Jako obciążenie przyjęto dwie siły skupione w odległości 1.8 m od siebie, co odpowiada naciskom osiowym w wózku pojazdu szynowego.

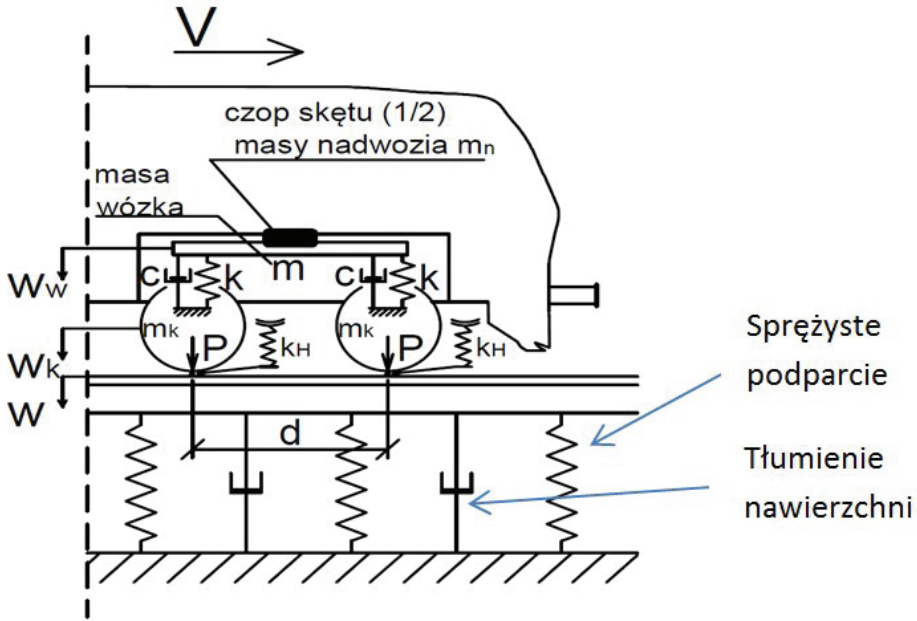
Model pojazdu przedstawiony na rys. 3 reprezentuje wszystkie lokomotywy posiadające wózki 2-osiowe o rozstawie osi 2.6 m. Dla obliczeń zamieszczonych poniżej przyjęto parametry jak dla lokomotywy TRAXX (w Polsce także jako EU-43). Jest to nowoczesna, wielosystemowa lokomotywa będąca na wyposażeniu polskich przewoźników.



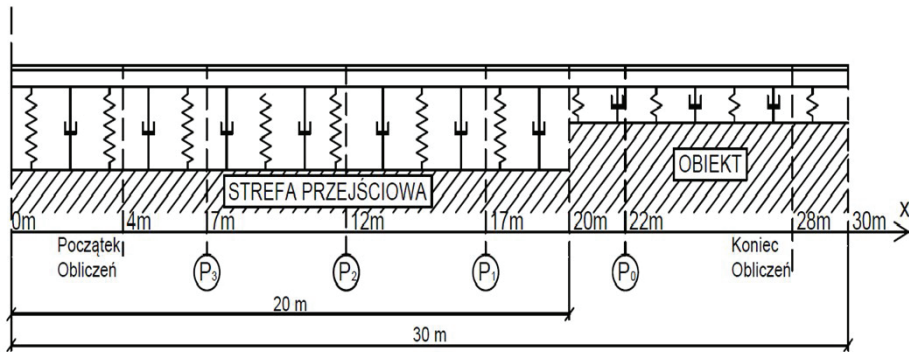
Rys. 1. Dane do obliczeń porównawczych – przypadek dwóch sił: U_1 , U_2 , U - współczynniki sztywności podłoża w strefie przejściowej w dwóch położeniach, oraz na obiekcie, c_1 , c_2 - współczynniki tłumienia podłoża w strefie przejściowej i na obiekcie.



Rys. 2. Model nawierzchni MES 3D – pokazano szczegóły podziału na elementy skończone (mesh). Zastosowano założenie o symetrii względem osi podłużnej toru – stąd rozważano połowę toru

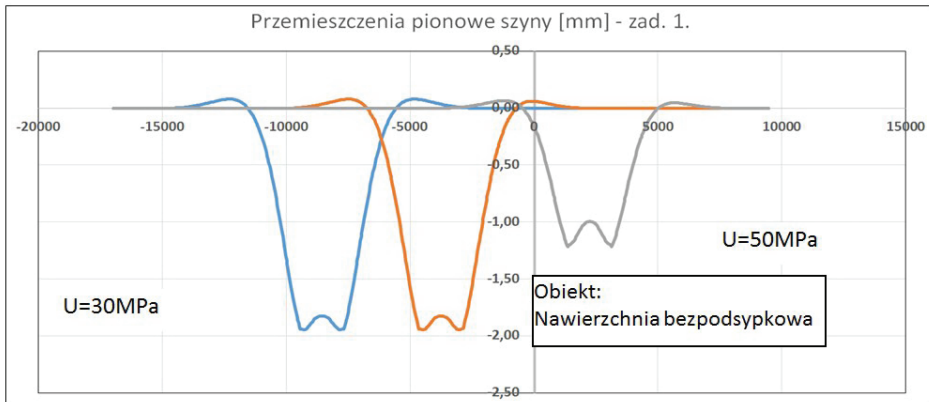


Rys. 3. Model pojazdu wykorzystany w modelu Różnic Skończonych

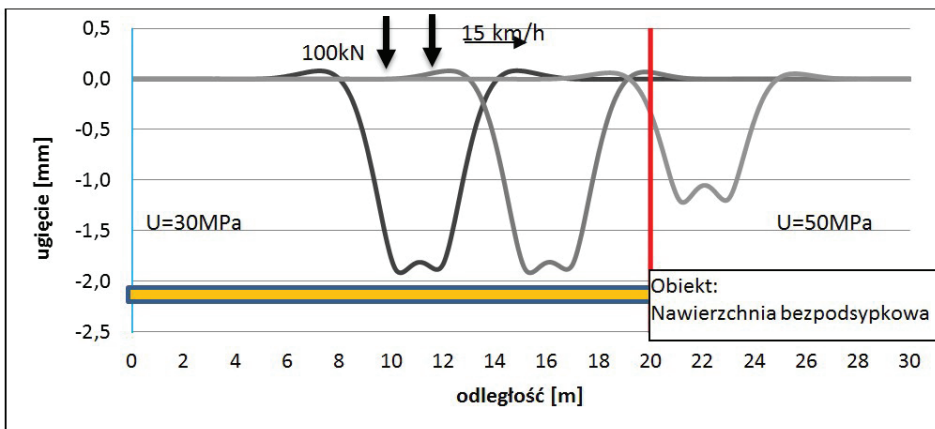


Rys. 4. Model nawierzchni MRS 2D do obliczeń porównawczych. Sztywność i tłumienie nawierzchni (oznaczenia jak na rys. 3)

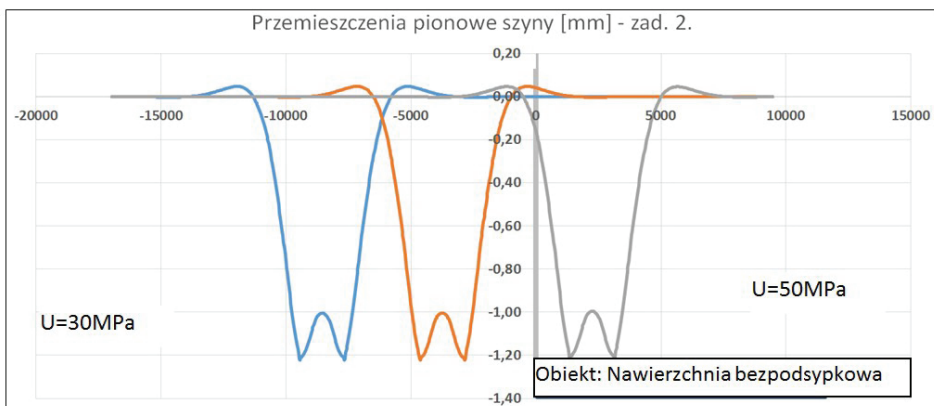
Poniżej pokazane są wykresy pokazujące ugięcia szyny w dwóch rozważanych przypadkach – w modelu pierwszym (MES) oraz w modelu drugim (MRS). Wykresy zestawione są parami: część a) dla pierwszego modelu oraz część b) dla drugiego modelu.



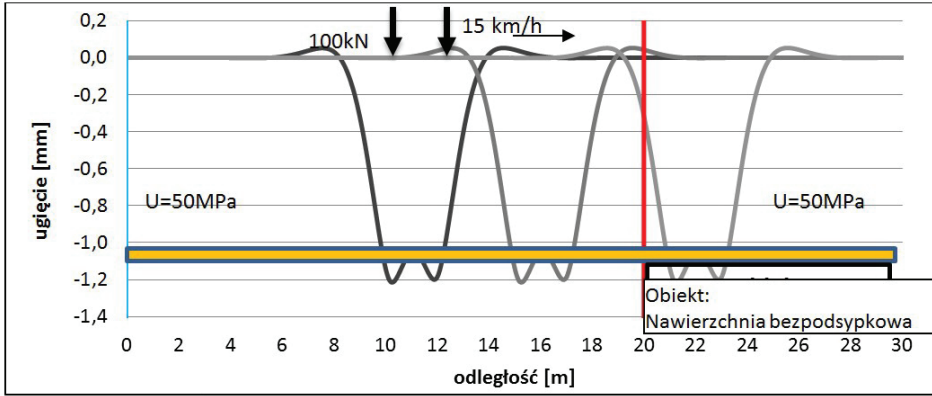
Rys. 5a. Zadanie 1, model MES: ugięcia szyny w funkcji odległości (pokazano kolejne fazy ruchu)



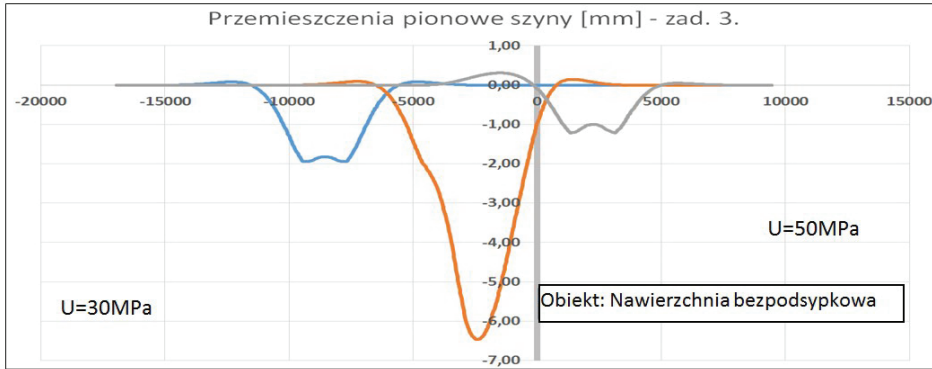
Rys. 5b. Zadanie 1, model MRS: ugięcia szyny w funkcji odległości (pokazano kolejne fazy ruchu)



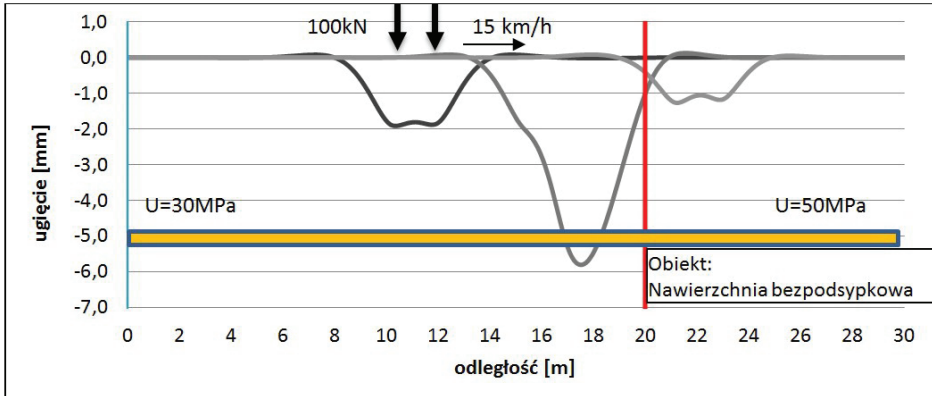
Rys. 6a. Zadanie 2, model MES: ugięcia szyny w funkcji odległości (pokazano kolejne fazy ruchu)



Rys. 6b. Zadanie 2, model MRS: ugięcia szyny w funkcji odległości



Rys. 7a. Zadanie 3, model MRS: ugięcia szyny w funkcji odległości – nadmierne ugięcie pojawia się w miejscu występowania luk pod podkładami



Rys. 7b. Zadanie 3, model MRS: ugięcia szyny w funkcji odległości – nadmierne ugięcie pojawia się w miejscu występowania luk pod podkładami

W wyniku obliczeń porównawczych, których wyniki zaprezentowano powyżej stwierdzono, że zgodność wyników pomiędzy oboma modelami jest duża oraz,

że największe zaburzenie w przejściu analizowanego wózka powstaje wtedy, kiedy pojawia się luka pod podkładem. Podobnie można wykazać, że „niecka” czy „rampa” (por. tab. 2 u dołu) są równie szkodliwe [13]. W następnym rozdziale wprowadzono analityczne miary niejednorodności układu nawierzchnia- podtorze, które wyjaśniają powstawanie luk jako efektów lokalnych przeciążeń nawierzchni w wyniku różnic mechanicznych z uwzględnieniem dwóch typów deformacji: tzw. „niecki” i rampy”.

4. Wpływ niejednorodności drogi kolejowej na oddziaływania i osiadanie

Na podstawie [13] efekt progowy jest analizowany przy pomocy porównania czterech podstawowych parametrów nawierzchni i podłoża:

- sztywności zginania układu nośnego nawierzchni,
- sztywności podłoża (tj. podłoża szyny oraz podłoża nawierzchni – tj. podtorza),
- masy nawierzchni,
- współczynnika tłumienia nawierzchni.

Wpływ tych parametrów określony jest z wykorzystaniem ugięcia szyny przed strefą przejściową w_0 .

1) przypadek różnic sztywności zginania i sztywności podłoża

Współczynnik λ nawierzchni w strefie przejściowej jest określony jako $\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{U_1}{4E_1}}$ oraz współczynnik na obiekcie jako $\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{U_2}{4E_2}}$. Współczynnik określający zwiększenia ugięć przed obiektem:

$$\eta_{szt} = \frac{2}{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2 + 1} - 1 \quad (1)$$

Współczynnik η_{szt} zależy od: U_i - współczynnik sztywności podłoża, E_i - sztywność szyny na zginanie ($i=1,2$). Ugięcie szyny w strefie przejściowej wynosi:

$$w_{szt} = \eta_{szt} \cdot w_0 \quad (2)$$

gdzie: w_0 - ugięcie szyny w przypadku braku różnic w sztywności podłoża oraz sztywności na zginanie.

2) Przypadek różnic masy nawierzchni

Ugięcie niestacjonarne wynikające z różnicy mas pomiędzy nawierzchniami określone jest przy pomocy wzoru:

$$\eta_m = \frac{C(m_1 - m_2)}{2 + C(m_1 - m_2)} \quad (3)$$

Zatem amplituda ugięcia niestacjonarnego (dodatkowego) po stronie nawierzchni w strefie przejściowej jest wyrażona następująco:

$$w_m = \frac{C(m_1 - m_2)}{2 + C(m_1 - m_2)} \cdot w_0 \quad (4)$$

gdzie: m_1, m_2 - masy jednostkowe nawierzchni w strefie przejściowej i na obiekcie, $C = \frac{v^2}{4\lambda^2 E} \cdot 1$ v - prędkość pojazdu.

3) Przypadek różnic współczynników tłumienia

$$\eta_c = \left(\frac{2 - \alpha\beta^{(1)}}{\left(\frac{1 - \alpha\beta^{(2)}}{1 - \alpha\beta^{(1)}} + 1 \right)} - 1 \right) \frac{1}{1 - \alpha\beta^{(1)}} \quad (5)$$

$$w_c = \eta_c \cdot w_0 \quad (6)$$

gdzie: $\beta^{(1)}, \beta^{(2)}$ - współczynniki tłumienia nawierzchni w strefie przejściowej

i na obiekcie, $\alpha = \frac{v}{v_c}$, w którym v_c jest prędkością krytyczną.

4) przypadek różnic więzów pomiędzy belką a podłożem

Biorąc pod uwagę wzór określający przyrost ugięcia szyny w strefie przejściowej, a także definiując następujący współczynnik:

$$\eta_{\text{więzy}} = \frac{2}{\left(\frac{\kappa_s^*}{\kappa_w^*} + 1 \right)^2} - 1 \quad (7)$$

gdzie: κ_s^* oraz κ_w^* są mnożnikami sztywności układu belka-podłoże w przypadku wzmocnienia więzów przy unoszeniu belki (nawierzchnia na obiekcie) oraz ich osłabienia (w strefie przejściowej). Zatem:

$$W_{wiazzy} = \eta_{wiazzy} \cdot W_0 \quad (8)$$

W szczególności, łączny efekt progowy z tytułu różnic pomiędzy łączonymi układami nawierzchnia-podłoże, zakładając że efekty dodają się liniowo, jest wyrażony jako suma:

$$W_{całkowite} = W_{szl} + W_m + W_c + W_{wiazzy} \quad (9)$$

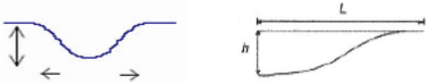
5. Podsumowanie – czynniki wpływające na efekt progowy

Przegląd literatury w zakresie badań modelowych oraz doświadczalnych związanych z efektem progowym, który obejmuje blisko 300 publikacji [13] oraz własne badania Autora przedstawia syntetycznie poniższa tabela. We wspomnianej pracy w ramach ogólnego efektu progowego, charakteryzującego się zwiększonymi oddziaływaniami dynamicznymi oraz degradacją nawierzchni i podtorza, zostały wyróżnione: „pierwotny efekt progowy” oraz „wtórnny efekt progowy”.

Tabela 1. Przyczyny efektu progowego

| Pierwotny („mechaniczny”) wynika z różnic parametrów pomiędzy układami nawierzchnia-podłoże ² | | Wtórnny („geometryczny”) wynika z deformacji geometrycznych, głównie tzw. niecki i rampy oraz luk pod podkładem |
|--|---|---|
| 1 | Zmiana sztywności podłoża – powoduje wzrost siły koło-szyna oraz przeciążenie podsypki i podtorza – to dodatkowe oddziaływanie jest mniejsze niż 7%, słabo zależy od prędkości, jest niesymetryczne – tj. strefy „zjazdowe” są mniej narażone na przeciążenie niż strefy „najazdowe” | Przyczynami wtórnego efektu progowego są: 1) Stale występujący efekt pierwotny, który inicjuje powstanie deformacji w przypadku obiektu nowo oddanego do użytku. Nawet przy idealnej geometrii toru pojawia się dodatkowe obciążenie nawierzchni przy zmianie: a) sztywności podłoża (do 7%), b) sztywności układu nośnego na zginanie (do 30%), c) masy układu nośnego nawierzchni (do 8%), d) zmianie tłumienia podłoża szyny (kilka procent). W/w przyczyny powodują przyspieszone osiadania nawierzchni podsypkowych. Osiedlenia te przybierają na ogół postać tzw. „niecki”. Ponieważ efekt progowy pierwotny jest w zasadzie symetryczny dla stref „najazdowych” i „zjazdowych” – stąd wywołuje on prawie symetryczne osiadania po obu stronach obiektu. Zróżnicowanie może wynikać z zastosowanego wzmocnienia podtorza i jakości robót w podtorzu. 2) Samoistne/naturalne osiadania podsypki i podtorza w wyniku oddziaływań dynamicznych i drgań propagowanych do podtorza Osiedlenia tego typu przyjmują kształt „rampy”. Sumują się one z deformacjami typu „niecka”. |
| 2 | Zmiana sztywności na zginanie układu nośnego nawierzchni spowodowana: a) fizycznie występującymi wzmocnieniami na zginanie (jak np. w nawierzchni typu RHEDA 2000) b) zmianą typu współpracy szyna-jej podłoże w wyniku przejścia z nawierzchni podsypkowej (występuje większe unoszenie szyny) na bezpodsypkową (mniejsze unoszenie, mocniejsze przytwierdzenie) – powoduje to efekty falowe przejścia pomiędzy dwoma różnymi ośrodkami – można zaobserwować zmianę <u>pozornej</u> sztywności szyny na zginanie, analogicznie jak w belce wolnopodpartej, w porównaniu z utwierdzoną na końcach. Ta pozorna zmiana sztywności jest szczególnie widoczna dla nawierzchni ERS, gdzie szyna jest obudowana żywicą poliuretanową. W wyniku występowania przyczyn a) i b) następuje przeciążenie nawierzchni i podtorza przed miejscem fizycznej lub pozornej zmiany sztywności na zginanie (strefy „najazdowe”) lub za tym miejscem – strefy „zjazdowe” – wpływ przeciążenia sięga 30%, co powoduje przyspieszone osiadania i formowanie się „niecki”. Efekt tego typu jest symetryczny („najazd” oraz „zjazd” są prawie identyczne). Słabozależny od prędkości. | |

2 Przez „podłoże” ogólnie rozumiane jest to co jest pod nawierzchnią, czyli albo podtorze albo obiekt mostowy

| | |
|---|--|
| <p>3 Zmiana masy układu nośnego nawierzchni Nawierzchnie podsypkowe posiadają większą masę: tj. ruszt torowy (szyny+podkłady+masa stowarzyszona). Nawierzchnie bezpodsypkowe, to są same szyny w przypadku bezpośredniego przytwierdzenia do płyty, nawierzchni RHEDA 2000 czy ERS. Podbudowa betonowa jest prawie nieodkształcalna. Nieco mniejszy efekt w przypadku EBS oraz LVT, jeśli się uwzględni masę bloków podszytowych Efekt <u>przeciążenia</u> występuje zawsze po stronie nawierzchni posiadającą <u>większą</u> masę – tj. przed miejscem łączenia nawierzchni podsypkowej i bezpodsypkowej (zmiana masy na mniejszą - strefy „najazdowe”) lub za tym miejscem (strefy „zjazdowe”). Przeciążenie sięga 8% - stąd zwiększone osiadanania. Efekt symetryczny, zależy od prędkości.</p> | <p>Nierówności geometryczne szyn typu „niecka” i „rampa” – powodują <u>znaczący</u> wzrost oddziaływań dynamicznych, które są 3-7 krotnie większe niż w przypadku statycznym. Deformacja typu „niecka”, charakteryzująca się krótką falą nierówności powoduje większe oddziaływania niż „rampa”.</p> <p>W przypadku efektu progowego wtórnego występuje <u>znacząca zależność od prędkości</u> pociągów oraz efekt sprzężenia zwrotnego w narastaniu deformacji.</p> <p>Efekt progowy wtórny może być kilkukrotnie większy (w sensie oddziaływań) niż efekt progowy pierwotny. niecka.....rampa</p> |
| <p>4 Zmiana tłumienia podłoża szyny Występuje efekt <u>przeciążenia</u> przy zmianie tłumienia nawierzchni zawsze po stronie tej nawierzchni, która ma <u>mniejsze</u> tłumienie. Wartości dodatkowego obciążenia sięgają kilku procent i zależą od prędkości. Efekt jest symetryczny – w przypadku stref „najazdowych”, pojawia się przed miejscem łączenia nawierzchni, w przypadku stref „zjazdowych” występuje za miejscem łączenia.</p> |  |

6. Wnioski

W zależności od typu obiektu (np. most, tunel, czy przejście na nawierzchnię bezpodsypkową), oddziaływania mechaniczne oraz kinematyczne od tych obiektów mają różny wkład do całkowitego efektu progowego. *Efekt progowy wtórny* może być minimalizowany przez zabiegi wzmacniające nawierzchnię i podłoże, jednakże – wykluczając sytuacje awaryjne i przyjmując co najmniej średni standard utrzymania podtorza – nie mają one decydującego znaczenia w sensie zmiany sztywności układu nawierzchnia-podtorze (o której decyduje nawierzchnia), wpływają one natomiast korzystnie na stabilność geometryczną poprzez ograniczenie osiadań i deformacji.

Biorąc pod uwagę powyższe, można stwierdzić, że dominujący *paradygmat wzmacniania* nawierzchni w celu utworzenia odpowiednio długiej *rampy* o zmiennej sztywności należałoby uzupełnić o element zginania. Tym bardziej, że obecnie stosowane nawierzchnie bezpodsypkowe posiadają dość zbliżoną sztywność do nawierzchni podsypkowych, ale znacząco różnią się pozostałymi parametrami.

Bibliografia

- [1] Alves A.C., Calçada R., Delgado R., Dynamic effects induced by abrupt changes in track stiffness in high speed lines. Applications of Comp. Mech. in Geotechnical engineering - Sousa, 2007, 473-483.
- [2] Bögl: FFB – nawierzchnia bezpodsypkowa firmy Bögl – materiały informacyjne, Bögl, 2008.

- [3] ČD S4 Železniční spodek - Přechodtělesaželezničního spodku na mostníobjekty, Příloha 24, 1998.
- [4] Davis D.D., Bridge approach performance in revenue service. *Railway Track and Structures*, Dec. 2003, 18-20.
- [5] Davis D., Plotkin D., Track settlement at bridge approaches: what causes track settlement at bridge approaches and how can railroad engineering departments deal with the problem safely and efficiently?. *Railway Track and Structures*, February 1, 2009.
- [6] Diaz A., La construcción de terraplenes y desmontes. *Fundación de los Ferrocarriles Espanoles*, 1993.
- [7] Eisenmann J., Durchführung von Dauerschwellversuchen an einer Übergangskonstruktion. *Technische UniversitätMünchen*, 1985-1990 (raport z badań).
- [8] EBGEO Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen, DGGT, Wyd. Ernst & Sohn, Berlin, 2003.
- [9] ERRI D 230.1/RP 3: Bridge Ends. Embankment Structure Transition, State of the Art Report, Utrecht, November 1999 (współautorzy: Kłosiński B., Niemierko A.).
- [10] PORR – nawierzchnie bezpodsypkowe, system prefabrykowanych płyt nośnych „ÖBB/PORR“ – materiały informacyjne, Porr, 2008.
- [11] Sasaoka D., Track transition designs for heavy-axle-load service: analyses of track transition issues at bridge approaches, road crossings and special track work find ways to minimize track stiffness and maximize maintenance dollars.(TTCI R&D). *Railway Track and Structures*, April 1, 2006.
- [12] Sołkowski J., Stiffness of the beam-foundation system under a moving load - a bi-linear model. *International Simulation Multiconference*, Den Hague, The Netherlands, 27-30 June, 2011.
- [13] Sołkowski J., Efekt progowy w nawierzchniach szynowych. *Monografia 435*, Politechnika Krakowska, 2013.
- [14] Rozporządzenie MTiGM w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowane, (Dz. U. 151, 1998) – § 49.1, § 49.4 wraz z „małą nowelizacją” (Dz. U. poz. 867, 5.06.2014).
- [15] UIC Code 719R Earthworks and track bed for railway lines, 3rd edition, February 2008
- [16] Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego, Id-3, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Warszawa 2008.

