

Koryto balastowe na gruncie jako alternatywa dla nawierzchni bezpodsytkowej

Ballast trough on ground as an alternative to slab track



Igor Gisterek

dr inż.

Jordahl & Pfeifer Technika
Budowlana sp. z o.o.

igor.gisterek@pwr.edu.pl

Streszczenie: Wraz ze wzrostem świadomości i oczekiwań dotyczących ochrony środowiska człowieka oraz zwiększenia komfortu pobytu w miejscu pracy i odpoczynku, odnotowuje się rosnącą rolę środków, technik i technologii mających na celu zapobieganie niekorzystnym wpływom wibroakustycznym: drganiom i hałasowi. Dla sprostania wymogom obowiązującego obecnie zrównoważonego rozwoju, stosowane rozwiązania w zakresie zabezpieczeń przed tymi wpływami powinny przynosić trwałe korzyści społeczne i ekonomiczne. W artykule został poruszony temat ochrony przed drganiami i hałasem ludzi przebywających w budynkach oraz samych budynków położonych w sąsiedztwie linii kolejowej, której parametry techniczne i eksploatacyjne zmieniono w istotnym stopniu. Zastosowano rozwiązanie w postaci koryta balastowego ułożonego na podłożu gruntowym. Tak wykonaną konstrukcję porównano pod względem technicznym i ekonomicznym z konkurencyjnymi rozwiązaniami.

Słowa kluczowe: Koryto balastowe; Tor klasyczny; Nawierzchnia bezpodsytkowa

Abstract: Along increase in expectancy concerning human environment and increase in comfort of habitat and workplace, rising role of means and measures protecting from excessive noise and vibrations can be noted. To meet the requirements of sustainable development, used countermeasures should result in lasting social and economic benefits. The paper deals with the subject of noise and vibration protection of people and structures along a railway line. A system consisting of concrete trough on ground, containing ballasted track was proposed and erected. This structure was compared with classic and slab track.

Keywords: Ballast trough; Ballasted track; Slab track

Liczne zarządy kolejowe, w tym polski, borykają się podczas modernizacji linii kolejowych przechodzących przez tereny zabudowane z problemem odpowiedniego doboru środków ochrony przed drganiami i hałasem. Wraz z coraz łatwiejszym dostępem do wiedzy i informacji, lokalne społeczności oraz pozostali sąsiedzi linii i stacji kolejowych powszechnie sygnalizują przekroczenia dopuszczalnych poziomów drgań i hałasu, jakie oddziałują na ich nieruchomości, domagając się ograniczenia ich natężenia poniżej dozwolonego progu. Jednym ze sprawdzonych sposobów obniżania poziomu oddziaływań dróg szynowych na otoczenie jest zastosowanie odpowiednio dobranej nawierzchni bezpodsytkowej. Sam dobór typu nawierzchni jest już zagadnieniem skomplikowanym – przykładowo, według

metody ANKOT opisywanej w [8], dla uzyskania optymalnej w danej lokalizacji konstrukcji, oczekuje się analizy 16 zagadnień technicznych. Dodatkowo, każdy rodzaj toru ma liczne odmiany, warianty czy elementy zamienne, które w znaczący sposób zwiększają liczbę kombinacji. Klasycznym antagonyzmem tego typu jest porównywanie wad i zalet nawierzchni podsytkowej i bezpodsytkowej. Rozpatrywane są np. zagadnienia niezmienności geometrycznej położenia toru, trwałości jego poszczególnych składników, kosztów czy właśnie poziomu oddziaływań na otoczenie. Okazuje się, że pod niektórymi względami klasyczna nawierzchnia podsytkowa ciągle jeszcze góruje nad intensywnie rozwijającymi się konstrukcjami bezpodsytkowymi. W celu eliminacji bądź ograniczenia jej oczywistych niedomagań stosuje się róż-

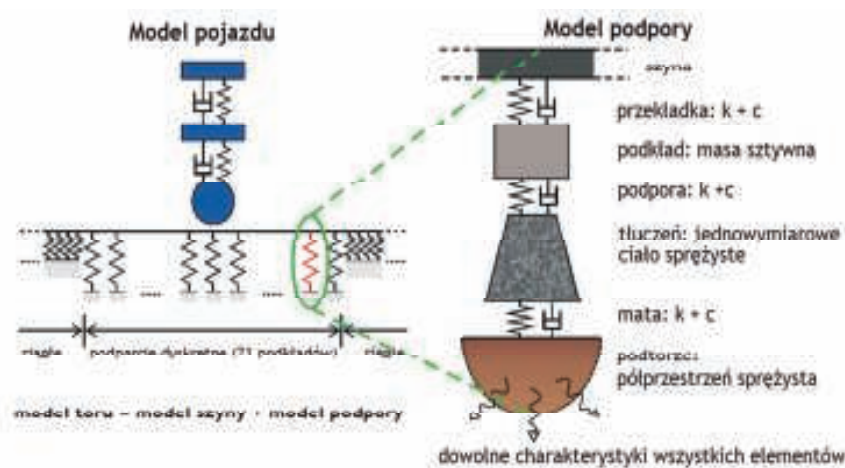
nego rodzaju elementy dodatkowe, jak geosyntetyki, maty podtłuczniowe czy chemiczną stabilizację tłucznia [1,4,10].

Tor w korycie balastowym – założenia

Właścicielem patentów nadanych w końcu lat 90. na opisywane rozwiązanie jest firma Grötz. Podstawowym elementem systemu jest koryto balastowe. Od rozwiązań znanych z obiektów mostowych różni się tym, że wykonane jest z modyfikowanego krzemianami niskoskurczowego betonu niezbrojonego o grubości około 65cm, z kontrolowanym sposobem powstawania rys [5]. Koryto częściowo zagłębione jest w gruncie, dzięki czemu zapewniona jest wysoka odporność systemu na przesuw poziomy. Duża powierzchnia oparcia płyty dennej zapewnia niskie



1. Przykładowy przekrój poprzeczny nawierzchni podsypkowej w korycie balastowym, za [1]



2. Model nawierzchni i pojazdu użyty w programie iSi, za [6]

naciski na podłoże, co powoduje, że system nadaje się do stosowania na gruntach o niskiej lub zróżnicowanej nośności. W pomiarach wykazano, że 50cm poniżej spodu warstwy podsypki naprężenia zmniejszają się o 50% w porównaniu z nawierzchnią klasyczną [6]. Elementy boczne koryta mogą być wykonywane jako monolit z dnem, jednak w przykładzie realizacyjnym zastosowano prefabrykaty i zespolono je z płytą za pomocą rozstawionych w regularnych odstępach stalowych trzpieni połączeniowych. Zastrzeżona jest również odmiana rozwiązania, w której w pryzmie podsypki umieszczone są blisko zewnętrznych krawędzi jej podstawy podłużne belki betonowe o przekroju trapezowym. Ich rolą jest zmniejszenie rozpełzania pryzmy podsypki, jednak bez zamiaru całkowitego wyeliminowania tego niekorzystnego zjawiska. Przykładowy przekrój po-

przezny nawierzchni podsypkowej w korycie balastowym pokazano na rysunku 1.

Zastosowanie sztywnego oparcia dla podsypki ma na celu ograniczenie możliwości jej przemieszczania, przez co należy rozumieć przede wszystkim utratę pierwotnego kształtu pryzmy (tzw. rozpełzanie), oraz wyeliminowanie możliwości powstawania tzw. worków podsypkowych. Ponadto wykazano, że udział podsypki w powstawaniu odkształceń trwałych klasycznej nawierzchni kolejowej czasami przekracza nawet 70% [9]. Samo ograniczenie przemieszczeń podsypki przez np. zwiększenie sztywności podłoża doprowadziłoby jednak do zwiększonych naprężeń w jej warstwie, a to mogłoby skutkować przyspieszonym zużyciem, np. przez ścieranie krawędzi ziaren lub przekruszenie. Dlatego wskazane jest wprowadzenie dodatkowych elemen-

tów wibroizolacyjnych, takich jak wysoce podatne przytwierdzenia, sprężyste podpory podkładów czy maty podtłuczniowe, które przejmą od warstwy podsypki zasadniczą część pracy konstrukcji nawierzchni w stanie sprężystym. Według założeń, nawierzchnia taka powinna być niemal beztrzymaniowa.

Model obliczeniowy i walidacja

Działanie systemu zasymulowano za pomocą specjalistycznego oprogramowania iSi, występującego w różnych wariantach, dedykowanych rozmaitym konstrukcjom nawierzchni. Program, którego opracowanie rozpoczęto już około roku 1995, bazuje na tzw. modelu bezwładnościowym. Jako obciążenie przyjęto powszechnie używany model pojazdu, składający się z trzech mas, połączonych więziami sprężystymi i tłumiącymi. Przejściowe odcinki toru, wprowadzające na zasadniczy, badany jego fragment, zamodelowano jako podparcie ciągłe. W odcinku środkowym model obejmuje 21 podpór dyskretnych, w formie przedstawionej i opisaną na rysunku 2.

Działanie programu ograniczono do sił i przemieszczeń pionowych. Inne modele [2,3] opierające się na zbliżonych założeniach pozwalają na uzyskiwanie wartości przemieszczeń, prędkości i przyspieszeń w danym punkcie trasy, zarówno dla toru, jak i dla pojazdu. Obciążenie stanowi w nich model pociągu o wielu stopniach swobody, co przybliży symulacje do stanu faktycznego, jednak użyta w nich procedura wymaga stosunkowo znacznego nakładu pracy obliczeniowej.

Dla potwierdzenia wyników symulacji komputerowych, w roku 2004 przeprowadzono na wykonanym odcinku toru pomiary zachowania nawierzchni pod obciążeniem ruchomym. Pociąg pomiarowy składał się z dwóch lokomotyw i dwóch wagonów oraz poruszał się z prędkościami 80, 100 i 125km/h. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1. Porównanie przeprowadzono parami, odnosząc do siebie względną różnicę tłumienia między poszczególnymi rozwiązaniami nawierzchni, liczbowo (w dB) i procentowo.

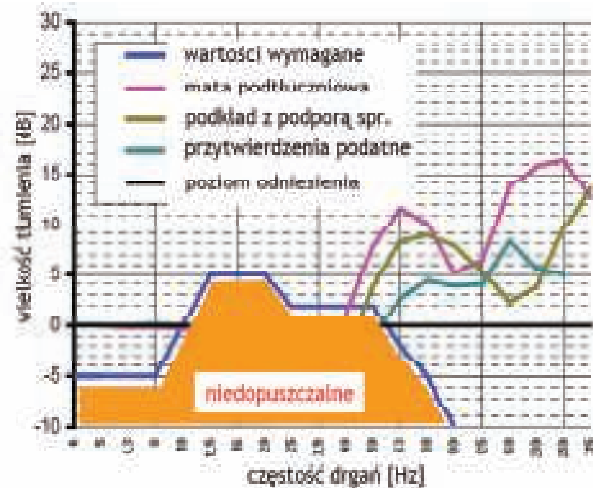
Analiza danych zestawionych w tab. 1 dowodzi, że zastosowanie rozwiązania w postaci koryta balastowego na gruncie z dodatkiem maty wibroizolacyjnej, spełniło wynikające z umowy między zarządem kolei a lokalnym samorządem wymagania ze znacznym zapasem. Zapas rozumiany jest jako różnica wartości pomiędzy liczbami z pierwszego wiersza tabeli a kolejnymi w tej samej kolumnie.

Przykłady realizacyjne

Koleje niemieckie DB zamówiły wykonanie odcinka próbnego w technologii Grötz na przebudowywanej i modernizowanej linii Karlsruhe – Bazylea, na stacji Baden – Baden (Oos). Odcinek próbny o długości około 300m został wykonany w roku 1997 [7]. Na podstawie zebranych wtedy doświadczeń w DB zapadła decyzja, że sąsiedni odcinek w miejscowości Sinzheim również zostanie zrealizowany w tym systemie. Wstępne pomiary wykazały, że w zasięgu oddziaływania inwestycji znajduje się około 200 domów, narażonych na wysoki poziom drgań i hałasu. Kwestię ochrony przed hałasem regulowało odrębne porozumienie z mieszkańcami, zawarte już w 1994. Dla ograniczenia emisji drgań, określono precyzyjnie wymagania, jakim powinna odpowiadać konstrukcja toru. W budynkach ze stropami drewnianymi poziom tłumienia miał być nie mniejszy niż 5dB w zakresie częstości 12,5 – 20Hz, a dla stropów betonowych 2 dB w zakresie 25 – 40Hz. Dla podłóg pływających dopuszczono wzrost drgań o 2,5 dB w paśmie 50 – 80Hz. Wstępna symulacja doprowadziła do wniosku, że żadne z trzech standardowo stosowanych rozwiązań – mata podtłuczniowa, podkłady z podporami sprężystymi oraz szczególnie podatne przytwierdzenia nie będzie wystarczająco efektywne, żeby samodzielnie zapewnić wypełnienie narzuconych warunków. Wyniki symulacji w postaci wykresu przedstawiono na rysunku 3. W efekcie obliczeń koryto systemu Grötz z matą wibroizolacyjną zainstalowano na dwóch odcinkach o długości 1000m i 910m, orientacyjnie od domu spokojnej starości do Kartunger Str. i od osi przystanku Sinzheim do wiaduktu drogi 500 [6]. Zastosowana

Tab. 1. Porównanie względnych poziomów emisji drgań dla systemu Grötz, za [5]

sytuacja porównawcza	Średnio 4-100Hz	strop drewn. 12,5-20Hz	strop bet. 25-40Hz	podł. pływ. 50-80Hz
wymogi gminy Sinzheim	+4,5dB -40%	+5dB -44%	+2dB -21%	-2,5dB +33%
System Grötz : nowy tor klasyczny	+7,3dB -57%	+10dB -68%	+7dB -55%	+6dB -50%
System Grötz : tor poprzedni (wyeks-ploatowany tor na podkł. drewn.)	+7,7dB -59%	+14dB -80%	+7dB -55%	+1,5dB -16%
Nowy tor klasyczny : tor poprzedni	0dB 0%	+4dB -37%	0dB 0%	-2dB +26%



3. Symulacja skuteczności wybranych rozwiązań obniżających poziom drgań w torze, za [5]

na tym odcinku mata podtłuczniowa typu USM 4015 charakteryzuje się grubością 14mm, sztywnością statyczną 0,15N/mm³ oraz sztywnością dynamiczną przy 40Hz wynoszącą 0,47N/mm³ pod obciążeniem 0,1N/mm².

Dla porównania cech oraz kosztów wybranych rozwiązań konstrukcyjnych toru dedykowanego kolejom dużych prędkości, w roku 2002 wykonano analizę [5]. Zestawiono w niej poszczególne elementy podtorza i nawierzchni, konieczne do zbudowania 1m toru pojedynczego. Klasyczną nawierzchnię podsypkową przyjęto jako poziom odniesienia, co może dziwić dziś, przy znacznej dominacji systemów bezpodsypkowych, natomiast w tamtym okresie rozważania takie były zdecydowanie uprawnione, mając na względzie doświadczenia eksploatacyjne kolei francuskich, hiszpańskich czy włoskich. Kluczową część porównania przedstawiono w tabeli 2.

Z analizy danych zawartych w tabeli wynika, że przygotowanie podtorza w systemie koryta balastowego na gruncie jest o połowę tańsze, niż w nawierzchni podsypkowej i czterokrotnie tańsze niż w nawierzchniach bezpodsypkowych. Koszt samej nawierzchni

nie jest porównywalny we wszystkich trzech rozpatrywanych przypadkach i wynosi orientacyjnie 170% ceny toru podsypkowego. Sumarycznie, wykazano że system koryta balastowego na gruncie jest o 260€/m droższy niż nawierzchnia klasyczna, ale do nawierzchni bezpodsypkowych należy dołożyć kolejne 400€/m.

Kolejnym istotnym aspektem, przemawiającym za wykonywaniem nawierzchni w postaci koryta balastowego na gruncie jest fakt, że bardzo łatwo jest w tej konstrukcji zniwelować wpływ niedokładności wykonawczych, dzięki pewnej dowolności kształtowania położenia toru w planie i profilu wewnątrz koryta. Również wpływ nieplanowanych, punktowych osiadań eksploatacyjnych, które nie są wynikiem stanu awaryjnego podtorza, da się pominąć przez proste podbicie z nasuwaniem toru.

Podsumowanie i wnioski

Nawierzchnia podsypkowa w korycie balastowym na gruncie stanowi interesujące ogniwo pośrednie między klasyczną nawierzchnią podsypkową a konstrukcjami bezpodsypkowy-

Tab. 2. Porównanie kosztów nawierzchni i podtorza w systemach: koryto balastowe na gruncie (Grötz), tor klasyczny, nawierzchnie bezpodsypkowe (Rheda i Getrac), za [5]

Tor pojedynczy	System Grötz	Tor podsypkowy	System Rheda	System Getrac
podłoże	warstwa ochronna, mrozoodporna, wyrównawcza E = 45-60MPa	warstwa ochronna, mrozoodporna E = 120MPa	warstwa ochronna, mrozoodporna E = 120MPa osiadania < 15mm	warstwa ochronna, mrozoodporna E = 120MPa osiadania < 15mm
koszt podłoża	90 €/m	200 €/m	360 €/m	360 €/m
nawierzchnia	Niebrojone koryto betonowe D>55cm, ew. mata podtłuczniowa, podsypka, podkład, przytwierdzenie, szyna	PSS podsypka, podkład, przytwierdzenie, szyna	Chudy beton, płyta B35 zbrojona, ew. ruszt torowy z różnymi rodzajami podkładów, przytwierdzenie, szyna	Chudy beton, odwodnienie ze studzienkami, 3x warstwa bitumiczna (>35cm), łącznik, podkład, przytwierdzenie, szyna
Koszt naw.	870 €/m	500 €/m	860 €/m	840 €/m
Redukcja hałasu	zbędna	zbędna	150 €/m	150 €/m
razem	960 €/m	700 €/m	1370 €/m	1350 €/m
Różnica do klasycznej	+ 260€/m	-	+ 670 €/m	+ 650 €/m

mi. W zamierzeniu ma łączyć przede wszystkim zalety obydwu systemów. Szczególnie obiecujące wydają się: możliwość stosowania na gruntach o nośności zbyt niskiej dla innych konstrukcji, łatwość dokonywania korekt położenia toru czy brak skokowych zmian sztywności podłoża na obiektach mostowych. Nie jest to jednak rozwiązanie całkowicie pozbawione wad – przykładowo, w klasycznej wersji dalej dochodzi do niekorzystnego zjawiska unoszenia tłucznia przy dużej prędkości ruchu kolejowego. W ogólnym rachunku zysków i strat kluczowe jest odwołanie się do dwudziestoletnich doświadczeń eksploatacyjnych użytkownika, czyli kolei niemieckich.

Z doświadczeń zawodowych autora wynika, że w obecnie realizowanych przedsięwzięciach budowlanych oraz rozstrzyganych przetargach w znakomitej większości przypadków możliwy jest jeden z dwóch scenariuszy: albo wykonawcy pozostawia się wolną rękę w zakresie doboru parametrów środka ochrony wibracyjnej, albo przepisuje się dokładnie charakterystyki wybranego produktu konkretnej firmy. Brakuje natomiast podstawowego wymogu - podania celu, jaki przez zastosowanie danego rozwiązania należy uzyskać, rozumianego jako obniżenie poziomu hałasu czy wielkości drgań do konkretnej, założonej wielkości, jak to opisano w artykule. Sprawia to, że w wielu lokalizacjach dobór wyrobów jest całkowicie przypadkowy, co przekłada się na ich ograniczoną skuteczność. Przy-

toczony przykład wskazuje, że już dwie dekady temu możliwe było przeprowadzenie stosunkowo mało złożonych obliczeń, których wyniki w wystarczająco dobry sposób są w stanie przybliżyć rzeczywiste charakterystyki tłumienne – sprężyste ulepszonej nawierzchni szynowej.

W krajach, w których poziom wykonawczy robót budowlanych często pozostawia wiele do życzenia, zaś podstawowym kryterium wyboru rodzaju konstrukcji jest cena wbudowania bez oglądania się na koszty eksploatacji, bezpieczniej jest stosować takie rozwiązania, które dają pewną możliwość łatwego dokonywania korekt i poprawek w okresie eksploatacji. Należy do nich opisywana w artykule nawierzchnia podsypkowa w korycie betonowym.

Celowe wydaje się prowadzenie dalszych prac nad rozwojem hybrydowych nawierzchni kolejowych. Najbardziej właściwym kierunkiem rozwoju powinna okazać się poprawa właściwości fizycznych podsypki tłuczniowej, jako elementu stanowiącego najsłabsze ogniwo nawierzchni oraz charakteryzującego się szczególnie wysoką i trudno mierzalną zmiennością cech. W wyniku tych badań może okazać się, że to właśnie nawierzchnia łącząca cechy podsypkowej i bezpodsypkowej jest w wybranych sytuacjach rozwiązaniem optymalnym. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Beton-Schotteroberbau (BSO). Materiały firmy Franz Grötz GmbH & Co. KG, 2011
- [2] Bryja D., Gisterek I., Popiołek A.: A computational method for acceleration analysis of a railway track with a stiffness discontinuity. W: Proceedings of the Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, s. 1-13
- [3] Bryja D., Hołubowski R., Gisterek I.: Railroad vehicle modelling in probabilistic vibration analysis of a railway bridge with randomly fluctuating track ballast stiffness. W: Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EU-RODYN 2014, s. 2737-2744
- [4] Gisterek I.: Badania i analiza efektów stabilizacji podsypki kolejowej. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, 2011
- [5] Müller-Borutta F.: Emissionschutz mit SYSTEME GRÖTZ BSO/MK – Ergebnis der Funktionsnachweismessung und Potenzial. Dokument zaprezentowany na spotkaniu DB Netz AG, Frankfurt, 20.11.2002
- [6] Müller-Borutta F.: Erschütterungsschutz bei Vollbahnen in der freien Strecke. Wystąpienie na Seminar Calenberg 29.11.2002, Bazylea
- [7] Müller-Borutta F., Rosenthal V., Breitsamter N.: Aboveground Low Vibration Emission Ballasted Track with Concrete Trough. Wystąpienie na: CFA/DAGA-Tagung 2004, Strasbourg
- [8] Nowosińska I.: Problemy wyboru konstrukcji nawierzchni – analiza metodą ANKOT. Problemy Kolejnictwa – Zeszyt 155, s. 72-92
- [9] Skrzyński E.: Podtorze kolejowe. PKP Polskie Linie Kolejowe, 2010
- [10] Szabo J.: Assessment and analysis of the behaviour of the railway superstructure in crushed stone ballast bed stabilized by ballast bonding technology under static and dynamic loads. Rozprawa doktorska, Budapeszt 2011
- [11] Szabo J., Szabo J.: Anwendungsmöglichkeiten für die Schotterverklebungstechnologie (Teil 1), Der Eisenbahn Ingenieur, EI 06/2008, s. 32-43