

# Wstępna symulacja współpracy podsyпки stabilizowanej i maty wibroizolacyjnej

Igor Gisterek

*W modernizowanych i nowo budowanych liniach kolejowych stosuje się zarówno klasyczną konstrukcję nawierzchni, jak i systemy bezpodsypkowe. Poza tym, rozwijana jest grupa rozwiązań, których założeniem jest połączyć zalety obydwu podstawowych typów nawierzchni przy jednoczesnej eliminacji ich wad. Do technik stosowanych w takich torach należą między innymi chemiczna stabilizacja podsyпки tłuczniowej, na przykład za pomocą żywic syntetycznych, czy stosowanie mat wibroizolacyjnych układanych na warstwie ochronnej lub w korycie balastowym. W niniejszym artykule opisano wstępną symulację za pomocą metody elementów skończonych toru kolejowego z zastosowaniem stabilizacji i wibroizolacji. Przedstawiono wyniki obliczeń, opisano wstępne wnioski z nich wynikające oraz wskazano dalsze kroki pożądane dla rozwoju modelu.*



dr inż.  
Igor Gisterek  
Politechnika Wroclawska  
Zakład Infrastruktury  
Transportu Szynowego  
igor.gisterek@pwr.edu.pl

## Wprowadzenie

W ramach unijnej polityki spójności Polska otrzyma w latach 2014-20 około 82,5 mld euro środków pomocowych. Z tej kwoty około 10,2 mld powinno zostać alokowane w sektor kolejowy. Dodając do tego przynajmniej 20% wkładu własnego, otrzymujemy niebagatelną sumę 51 miliardów złotych. Środki te w znaczącej części zostaną przeznaczone na modernizację, naprawy i budowę setek kilometrów infrastruktury torowej i przytorowej. Poza stosowaniem rozwiązań klasycznych i bezkrytycznym kopiowaniem rozwiązań zachodnich, w kraju trwają od pewnego czasu prace mające na celu opracowanie nowoczesnej nawierzchni kolejowej, stanowiącej ogniwo pośrednie między konstrukcjami tradycyjnymi i bezpodsypkowymi [1]. Wyniki tych badań mogą stanowić punkt wyjścia do wprowadzenia standardu ulepszonej nawierzchni kolejowej, również z myślą o przyszłych liniach dla kolei dużych prędkości. Do czynników poprawiających pracę klasycznej nawierzchni kolejowej zalicza się m.in. stabilizację chemiczną podsyпки oraz maty wibroizolacyjne. Wstępna symulacja współpracy tych dwóch rozwiązań za pomocą metody elementów skończonych została opisana w poniższym artykule.

## Chemiczna stabilizacja podsyпки

Wzmocnienie podsyпки kolejowej za pomocą żywic syntetycznych obejmuje przede wszystkim zastosowania lokalne i tymczasowo-

we. Należą do nich między innymi:

- utrzymywanie pionowych skarp podsyпки na długości toru podczas prac budowlanych na sąsiednim torze,
- stabilizacja położenia toru w strefach przejściowych przy mostach, wiaduktach i tunelach,
- zwiększenie oporu na przesuw poprzeczny torów położonych w łuku poziomym oraz rozjazdów,
- wykonywanie chodników służbowych i przejazdów awaryjnych [4].

W toku prowadzonych badań i doświadczeń prowadzone są różnorodne doświadczenia, których celem jest sprawdzenie zastosowania żywicznej stabilizacji podsyпки na całej widocznej powierzchni kruszywa obejmującej wolne przestrzenie pomiędzy rusztem torowym oraz wariantowo powierzchnie skarp przyzmy podsyпки. Wzmocniona w ten sposób nawierzchnia powinna charakteryzować się przede wszystkim:

- zmniejszeniem sumarycznych osiadań,
- mniejszym zużyciem podsyпки,
- łagodniejszym charakterem nierówności geometrycznych toru,
- obniżonym zapotrzebowaniem na prace utrzymaniowe,
- wyeliminowaniem zjawiska unoszenia ziaren tłuczni przez przejeżdżające składy [2, 3].

Długofalowym celem prac i badań nad chemiczną stabilizacją podsyпки kolejowej jest potencjalne wprowadzenie ulepszonej nawierzchni kolejowej na długich odcinkach torów, szczególnie wysokich kategorii, obciążonych ruchem szybkim i bardzo szybkim oraz ciężkim. Potrzeba prowadzenia tego typu badań wynika przede wszystkim z licznych wad nawierzchni klasycznej, bardzo wysokiego kosztu wbudowania nawierzchni bezpodsypkowych oraz – ze względu na praktyczny brak możliwości dokonywania późniejszych poprawek i regulacji – konieczność perfekcyjnego wykonania wszystkich robót prowadzących do uzyskania stabilnego, odpornego na osiadania, podłoża.

## Maty wibroizolacyjne

Stosowanie rozwiązań wibroizolacyjnych w transporcie szynowym ma dwa główne cele: ograniczenie uciążliwości dla otoczenia oraz zwiększenie trwałości komponentów systemu tor - pojazd. Do podstawowych rodzajów nawierzchni szynowych z wibroizolacją zalicza się między innymi:

- nawierzchnię klasyczną ze sprężystymi podporami podkładów (tzw. zelówki),
- nawierzchnię klasyczną z matą układaną pod podsypką,
- lekki system masowo – sprężysty z zastosowaniem mat,
- ciężki system masowo – sprężysty na elementach elastomerowych,
- ciężki system masowo – sprężysty na elementach stalowych,
- hybrydy i modyfikacje powyższych rozwiązań.

Stosowanie elementów o charakterystyce sprężysto – tłumiącej skutkuje przede wszystkim zmniejszeniem poziomu wibracji wywołanych przejazdem pojazdu, bardziej równomiernym rozkładem obciążeń na podłożu, ograniczeniem zużycia podsyпки przez przeniesienie jej pracy na elementy bardziej podatne oraz zmniejszeniem poziomu odkształceń skumulowanych nawierzchni i podtorza. Rosnącą popularność rozwiązań z zastosowaniem wibroizolacji notuje się w transporcie kolejowym, gdzie służy do wytłumienia torów zwłaszcza na wiaduktach i w obrębie stacji, ale przede wszystkim w transporcie tramwajowym, gdzie ze względu na wysokie wymagania ochrony środowiska przed hałasem i drganiami oraz niedużą odległości pomiędzy torami i zabudową konieczne jest wyjątkowo skuteczne ograniczenie przenoszenia oddziaływań. Szczególnie uciążliwy w warunkach miejskich jest wysoki poziom oddziaływań wtórnych, typowy dla wyeksploatowanych budynków konstrukcji tradycyjnej. Stosowanie torowisk wyposażonych w rozwiązania ograniczają-

ce rozchodzenie się drgań i hałasu wydłuża również trwałość nawierzchni szynowych, zmniejsza zużycie pojazdów oraz wpływa na dalszą redukcję kosztów zewnętrznych transportu zbiorowego, które i tak są wyjątkowo korzystne w porównaniu z indywidualnym transportem samochodowym.

## Symulacja komputerowa

W celu zasymulowania współdziałania podsypki stabilizowanej chemicznie oraz maty wibroizolacyjnej stworzono za pomocą programu komputerowego metody elementów skończonych (MES) model fragmentu nawierzchni i podtorza kolejowego. Na tym etapie badań ograniczono się jedynie do symulacji w przekroju poprzecznym. Na przekroju uwzględniono: podkład strunobetonowy o długości 2,60 m, 35 cm podsypki tłuczniowej, 25 cm warstwy ochronnej z niesortu i nasyp o wysokości 2,50 m. Czoła podkładów zostały obsypane na szerokość 50 cm, zaś pochylenie skarp założono 1:1,5. Tak zamodelowaną konstrukcję warstwową posadowiono na podłożu sztywnym, bez możliwości przesuwu poprzecznego. Obciążenie zrealizowano poprzez parę obciążeń rozłożonych, przyłożonych w miejscach nacisku szyn na podkład, na szerokość stopki szyny. Uznano, że stanowi to wystarczająco dokładne przybliżenie przekazywania obciążeń realizowanego przez przytwierdzenia sprężyste typu SB, zwłaszcza że podstawowym celem modelu jest badanie zachowania gruntu, a nie naprężeń i odkształceń wewnątrz podkładu. Dla celów porównawczych używano również modelu bez stabilizacji i maty. Do programu matę o grubości 5 cm

wprowadzono poniżej poziomu podsypki, tworząc pasujące wymiarami wyżłobienie w warstwie ochronnej. W rzeczywistości matę układa się na górnej powierzchni warstwy ochronnej, ale ze względu na ograniczenia geometryczne programu było to utrudnione. Jednocześnie założono, że tak niewielka nieściśłość nie wpłynie znacząco na zachowanie całego modelu. Badano również warstwę podsypki stabilizowanej o grubości 10, 15, 20, 25, 30, 25, 40, 45 i 50 cm. Wzmocnienie żywiczne nie obejmowało skarp przyzmy podsypki aż do poziomu warstwy ochronnej, lecz jedynie w takiej postaci, jakby stabilizacji dokonano wyłącznie przez pionowy natrysk lepiszcza na tor aż do uzyskania wymaganej grubości warstwy, jak pokazano na ilustracji 1.

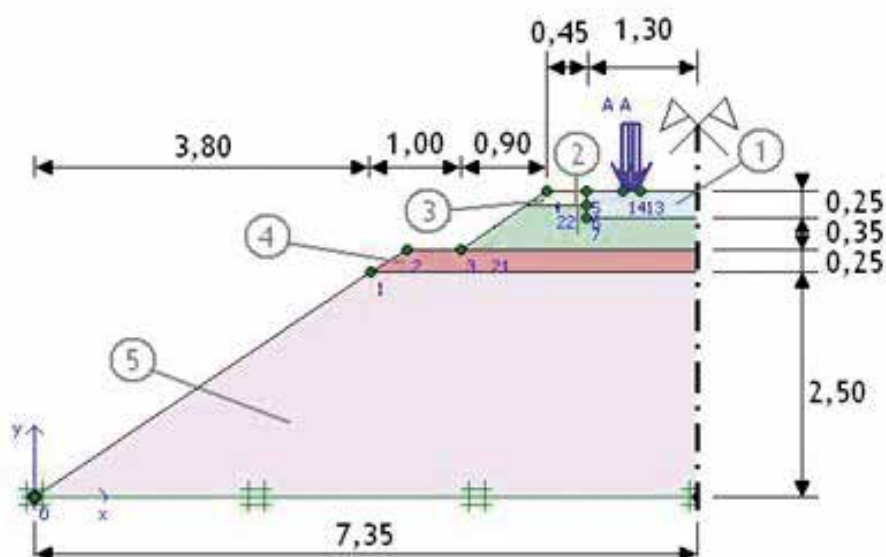
## Wyniki

W modelu porównano osiem wielkości charakteryzujących stan toru i podtorza kolejowego: przemieszczenia pionowe i poziome, naprężenia poziome, pionowe i podłużne oraz odkształcenia poziome, pionowe i skrętne. Zestawiono je w Tabeli 1 oraz na ilustracjach 2 - 9. Analiza i interpretacja uzyskanych wyników nie przynosi do końca jednoznacznego rozstrzygnięcia, ale pozwala na sformułowanie kilku wstępnych spostrzeżeń. Wprowadzenie maty wibroizolacyjnej obniżyło maksymalne przemieszczenia pionowe o około 3%. Ten pozorny absurd wynika z faktu wciągnięcia do współpracy dzięki ugięciu maty szerszej powierzchni podsypki, przez co uzyskuje się nieco korzystniejszy rozkład ciśnień oraz szerszy kształt klina rozłamu. Z tego samego powodu uzyskano obniżenie wartości

maksymalnych przemieszczeń poziomych o około 10%. Wielkości naprężeń poziomych  $\sigma_{xx}$  również uległy pewnemu zmniejszeniu (w wartościach bezwzględnych – zwiększeniu), o maksymalnie 8%. Wielkości naprężeń pionowych  $\sigma_{yy}$  dla małych grubości warstwy stabilizowanej, tj. 10 i 15 cm nie odpowiadają linii trendu dla pozostałych wartości, dlatego trudno tu o jednoznaczną interpretację; dla grubości 20 cm i większej wartości bezwzględne tych naprężeń ulegają nieistotnemu zwiększeniu. Zdecydowanie wyraźny trend charakteryzuje natomiast naprężenia podłużne  $\sigma_{zz}$ , których wartości zwiększają się ze stabilnego poziomu -54 na -90 : -100 kN/m<sup>2</sup>. W zakresie odkształceń, zarówno odkształcenia poziome  $\epsilon_{xx}$  i odkształcenia skrętne  $\gamma_{xy}$  wykazują zmniejszenie wartości nawet o około 30%, lecz tylko dla wybranych grubości warstwy stabilizacji; trudno też jest wyznaczyć jakąś linię trendu. Z kolei wartości odkształceń pionowych  $\epsilon_{yy}$  wykazują kilkukrotny (z około 0,5 na około 1,5 %) wzrost, również nie cechujący się jednoznaczną linią trendu w zależności od grubości warstwy stabilizowanej.

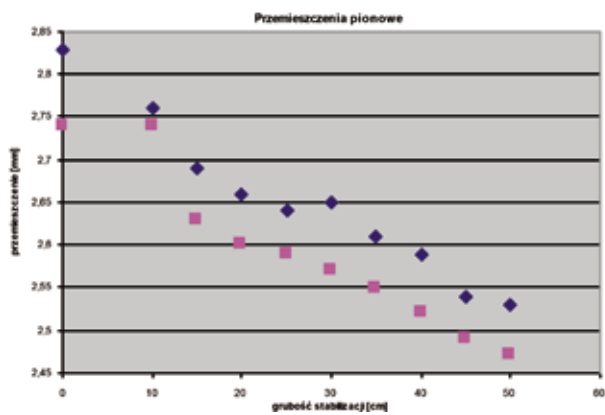
## Wnioski i podsumowanie

Płaska symulacja złożonego zagadnienia przestrzennego nie przynosi pełnej odpowiedzi na pytanie o dokładne zachowanie skomplikowanej konstrukcji rusztu torowego, podpartego w sposób quasiciągły. Nawet uzupełnienie o model w przekroju podłużnym, z obciążeniem kilku podkładów, wciągniętych do współpracy przez ugięcie szyn, daje jedynie przybliżone pojęcie o pracy konstrukcji. Dopiero złożony,

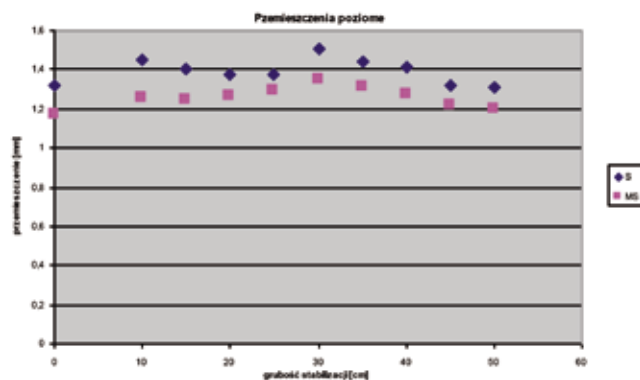


- ① podkład
- ② podsypka
- ③ warstwa stabilizowana
- ④ warstwa ochronna
- ⑤ grunt

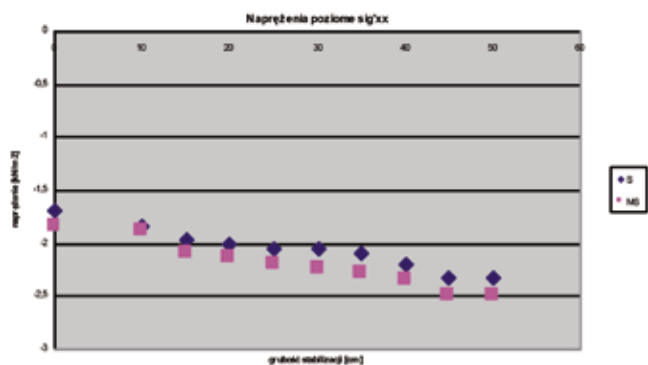
1. Widok połowy modelu z podaniem podstawowych wymiarów



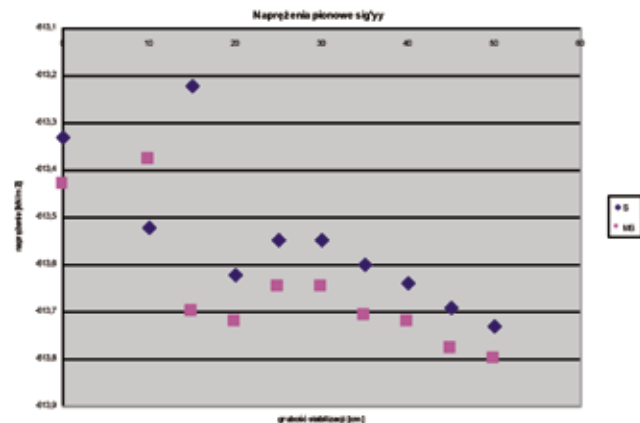
2. Przemieszczenia pionowe  $U_y$



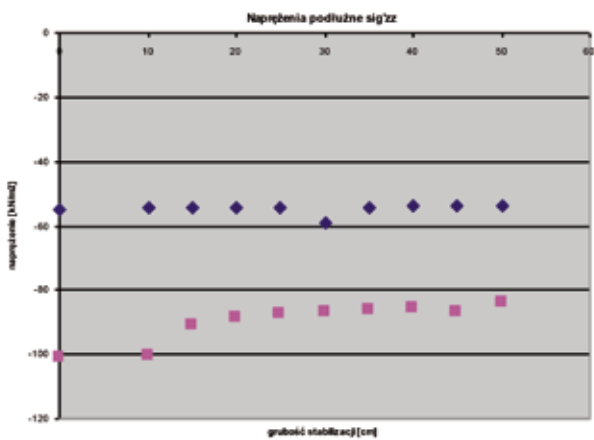
3. Przemieszczenia poziome  $U_x$



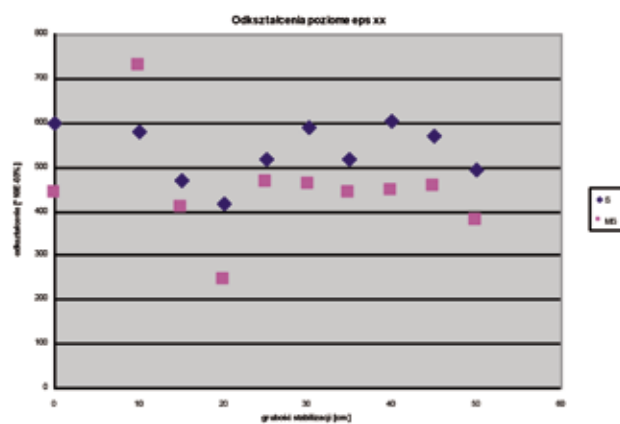
4. Naprężenia poziome  $\sigma_{xx}$



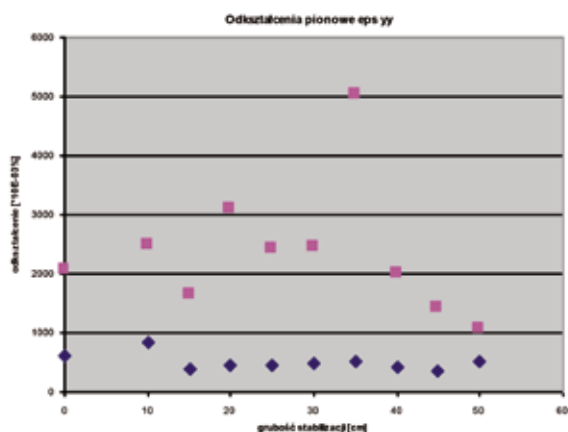
5. Naprężenia pionowe  $\sigma_{yy}$



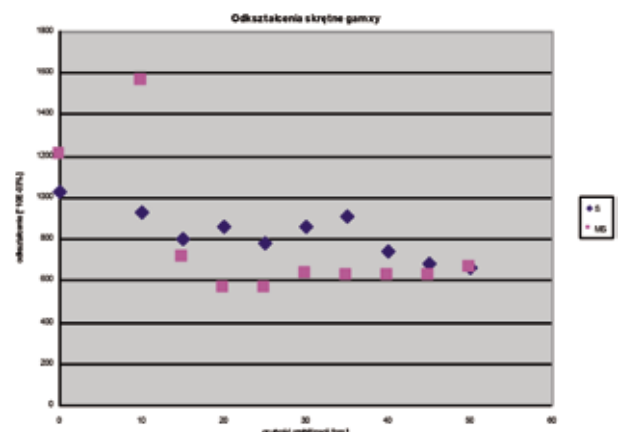
6. Naprężenia podłużne  $\sigma_{zz}$



7. Odształcenia poziome  $\epsilon_{xx}$



8. Odształcenia pionowe  $\epsilon_{yy}$



9. Odształcenia skrętne  $\gamma_{xy}$

**Tab. 1.** Zestawienie maksymalnych wartości przedstawionych na ilustracjach 2 – 9. W pierwszej kolumnie zestawiono grubość stabilizacji tłuczni [cm], z dopiskiem „m” – przy zastosowaniu maty podtłuczniowej

Gr.	$U_y$	$U_x$	$\sigma'_{xx}$	$\sigma'_{yy}$	$\sigma'_{zz}$	$\epsilon_{xx}$	$\epsilon_{yy}$	$ v_{xy} $
0	2,83	1,32	-1,69	-613,33	-54,95	599,15	613,33	1026
0m	2,74	1,17	-1,83	-613,43	-101,07	441,19	2060	1210
10	2,76	1,45	-1,84	-613,52	-54,58	581,35	835,69	931,89
10m	2,74	1,25	-1,88	-613,38	-100,24	727,48	2470	1560
15	2,69	1,4	-1,96	-613,22	-54,31	469,94	379,85	805,1
15m	2,63	1,24	-2,09	-613,7	-90,93	407,43	1650	711,13
20	2,66	1,38	-2,01	-613,62	-54,22	418,11	446,48	855,67
20m	2,6	1,26	-2,14	-613,72	-88,57	246,69	3090	567,43
25	2,64	1,38	-2,04	-613,55	-54,14	517,9	436,77	783,62
25m	2,59	1,29	-2,19	-613,65	-87,35	464,04	2410	568,54
30	2,65	1,51	-2,04	-613,55	-59,38	588,58	496,08	856,55
30m	2,57	1,35	-2,23	-613,65	-86,82	460,58	2460	634,06
35	2,61	1,44	-2,1	-613,6	-54,09	515,66	501,61	911,85
35m	2,55	1,31	-2,29	-613,71	-86,11	438,76	5020	625,05
40	2,59	1,41	-2,19	-613,64	-54,06	602,54	421,08	743,5
40m	2,52	1,27	-2,35	-613,72	-85,91	445,57	2010	625,64
45	2,54	1,32	-2,33	-613,69	-53,9	570,17	344,2	686,22
45m	2,49	1,22	-2,5	-613,78	-86,92	456,74	1430	618,75
50	2,53	1,31	-2,33	-613,73	-53,87	495,61	521,54	658,67
50m	2,47	1,2	-2,49	-613,8	-84,13	378,6	1070	663,63

trójwymiarowy model pod obciążeniem zbiorem mas skupionych lub jeszcze lepiej, modelem składu rzeczywistego oraz losowo zmiennymi parametrami materiałowymi warstw konstrukcji przyniesie wyniki porównywalne z tymi osiągalnymi w pomiarach toru rzeczywistego [6]. Pewna istotna trudność ukryta jest również w sposobie przeniesienia symulacji od pojedynczych obciążeń czy krótkotrwałych serii obciążeń na odkształcenia skumulowane, długotrwałe, typowe dla rzeczywistych konstrukcji w budownictwie liniowym. Niemniej, zaprezentowany w artykule model wstępny może znaleźć zastosowanie jako obiekt porównawczy dla klasycznej konstrukcji toru oraz toru z żywiczną stabilizacją powierzchniowej warstwy podsypki tłuczniowej. Interesującą i wartą dalszej obserwacji ścieżką rozwoju jest również umieszczenie klasycznej konstrukcji toru w żelbetowym korycie wyłożonym matami wibroizolacyjnymi, jak np. w systemie Grötz, stosowanym eksperymentalnie na linii kolejowej dużych prędkości w Niemczech.

Otrzymane wyniki symulacji nie pozwalają na jednoznaczne stwierdzenie, na ile wprowadzenie warstwy wibroizolacji wpływa na poprawę pracy konstrukcji toru

i podtorza. Częściowo odpowiedzialne za to są ograniczenia programu, dedykowanego w zasadzie zagadnieniom mechaniki dużych brył gruntów, gdzie trudno jest zamodelować z należytą dokładnością (gęstość siatki elementów skończonych) warstwy o kilkucentymetrowej grubości. Celowe wydaje się kontynuowanie badań i symulacji w innych programach MES. Spadek wielkości przemieszczeń i odkształceń maksymalnych pozwala wstępnie wnioskować, że i odkształcenia trwałe toru uległyby zmniejszeniu, zatem trwałość toru i podtorza uległaby wydłużeniu [5]. Na tej podstawie można stwierdzić, że łączne stosowanie mat i stabilizacji zmniejsza oddziaływania na podtorze, wydłużając jego żywotność.

Pożądaną jest również zbudowanie odcinka toru doświadczalnego, najlepiej w postaci niedługiego odcinka toru na eksploatowanej linii kolejowej, obciążonej w znacznym stopniu możliwie różnorodnym ruchem. Wyniki kilkuletniej obserwacji prowadzonych na odcinku eksperymentalnym pozwolą na sprawdzenie celowości i zasadności łączenia elementów wibroizolacyjnych i chemicznej stabilizacji podsypki w celu poprawy parametrów toru podsypkowego. ◀

## Materiały źródłowe

- [1] Basiewicz T., Gołaszewski A., Towpik K.: Ocena celowości zastosowania nawierzchni niekonwencjonalnej na liniach dużych prędkości w warunkach polskich kolei. PW, Warszawa 2006
- [2] Fendrich L.: Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Springer 2007
- [3] Frenzel J., Frenzel J.: Neues Gleisoberbausystem Durflex. Eisenbahningenieur 3/2008
- [4] Gisterek I.: Badania i analiza efektów stabilizacji podsypki kolejowej. Praca doktorska, PWr 2011
- [5] Skrzyński E.: Podtorze kolejowe. KOW 2010
- [6] Zand J. Van't, Moraal J.: Ballast resistance under three dimensional loading. Raport 7-97-103-4 TU Delft 1997

Uwaga do ilustracji 2 – 9: seria danych **S** oznacza model z warstwą stabilizacji podsypki, seria **MS** – ze stabilizacją i matą podtorzową