

NIEKONWENCJONALNA KONSTRUKCJA NAWIERZCHNI DROGI SZYNOWEJ – LONGASF¹

Włodzimierz Czyczuła

Prof. dr hab. inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, tel.: +48 12 628 23 58, e-mail: czyczula@pk.edu.pl

Małgorzata Urbanek

Mgr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, tel.: +48 12 628 23 58, e-mail: murbanek@pk.edu.pl

***Streszczenie.** W pracy przedstawiono koncepcję i wyniki podstawowych obliczeń niekonwencjonalnej konstrukcji nawierzchni LONGASF, która może być zastosowana zarówno na liniach kolejowych, jak i w sieciach tramwajowych. W odniesieniu do nawierzchni kolejowych, jako podłoże prefabrykowanych podkładów wzdlużnych można zastosować typowe konstrukcje drogowe - asfaltobeton. Omówiono konstrukcję nawierzchni. Przedstawiono metodykę badań.*

***Słowa kluczowe:** nawierzchnia kolejowa, podłoże asfaltowe, podkłady wzdlużne, modelowanie statyczne i dynamiczne*

1. Niekonwencjonalne nawierzchnie kolejowe

Rozwój i upowszechnienie konstrukcji niekonwencjonalnych nawierzchni kolejowych związany jest głównie z potrzebą zmniejszenia kosztów utrzymania infrastruktury kolejowej. Rodzi się pytanie, czy stosowana do tej pory nawierzchnia podsypkowa jest rozwiązaniem racjonalnym, a istniejące do tej pory nawierzchnie niekonwencjonalne spełniają warunek obniżenia kosztów ich wykonania i utrzymania.

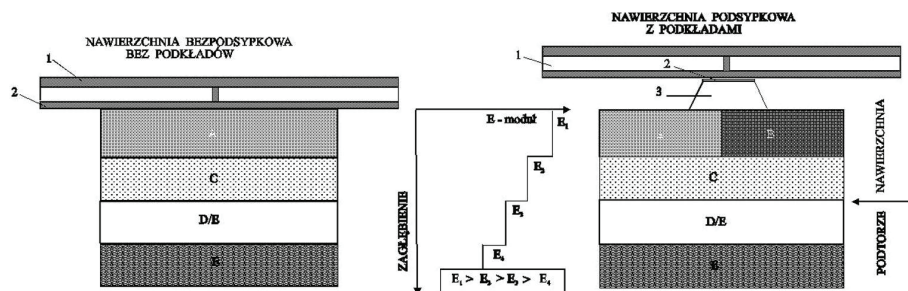
Niekonwencjonalnymi nawierzchniami kolejowymi przyjęto nazywać konstrukcje, które w odróżnieniu od rozwiązań klasycznych pozbawione są warstwy podsypki, a podłoże składa się zazwyczaj z kilku warstw wykonanych z gruntu stabilizowanego hydraulicznie, mieszanki bitumicznej lub kompozytu gruntowo-cementowego. Podłożem może być również konstrukcja w postaci płyty betonowej prefabrykowanej lub wykonywanej bezpośrednio w miejscu układania nawierzchni oraz konstrukcja obiektu inżynierskiego [2].

Nawierzchnie bezpodsypkowe stosowane są w ograniczonym zakresie, przede wszystkim w obiektach inżynierskich na długości strefy przejściowej, jak również na odcinkach toru w obrębie stacji i przystanków, w strefach przyspieszonej degradacji

¹ Wkład procentowy poszczególnych autorów: Czyczuła W. 50%, Urbanek M. 50%. Obliczenia numeryczne przy użyciu programów i procedur obliczeniowych wykonał mgr inż. Dariusz Kudła

podsyпки. W tego typu konstrukcjach stosowane są materiały o ściśle określonej sprężystości mieszczącej się w wąskim przedziale tolerancji i zachowujące swe własności w warunkach dużych obciążeń dynamicznych w celu uzyskania wymaganej sprężystości i tłumienia.

Projektowanie nawierzchni niekonwencjonalnej o wielowarstwowej konstrukcji wymaga takiego doboru materiału i grubości poszczególnych warstw, aby konstrukcja pracowała w zakresie odkształceń sprężystych. Do projektowania wykorzystać można doświadczenia i metody stosowane przy ocenie nośności dróg samochodowych, gdzie posługiwano się takimi wskaźnikami, jak CBR, moduł sprężystości gruntu podłoża, współczynniki podatności i moduły odkształcenia podłoża.



1 – szyna, 2 – przytwierdzenie typu Vossloh 300, 3 – podkład betonowy
 A – warstwa nośna z betonu, B – nośna warstwa z materiałów bitumicznych, C – warstwa nośna z materiału stabilizowanego spoiwem hydraulicznym, D – warstwa przeciwmrozowa, E – podtorze gruntowe

Rys. 1. Zasada wymiarowania wielowarstwowej nawierzchni bezpodsypkowej przyjęta przez koleje niemieckie [2]

Niekonwencjonalna konstrukcja drogi szynowej składa się przeważnie z:

- właściwej nawierzchni (szyna, przytwierdzenie, podkład, punktowe podparcie szyny lub podparcie ciągłe płytą betonową, betonową warstwą),
- podłoża obejmującego podtorze w postaci warstw ochronnych, w tym górnej warstwy przeciwmrozowej oraz niezwiązanej warstwy nośnej z gruntu zagęszczonego lub niesortu, spoczywającej na gruncie rodzimym [1].

Przykład schematycznego podziału stosowanych obecnie konstrukcji niekonwencjonalnych pokazano na poniższym rys. 2.

Doświadczenia ostatnich lat, zwłaszcza badania kolei niemieckich, doprowadziły do ustalenia pewnych wymogów odnoszących się do konstrukcji nawierzchni niekonwencjonalnych i zasad ich stosowania.[2]. Układanie nawierzchni niekonwencjonalnych bezpodsypkowych uzasadniane jest przede wszystkim, co najmniej dziesięciokrotnym zmniejszeniem kosztów utrzymania, większą statecznością położenia toru oraz możliwościami zmniejszenia wymiarów konstrukcji w tunelach i obiektach inżynierskich, co umożliwia zwiększenie skrajni i przekrojów poprzecznych w tunelach i na mostach.

Układanie nawierzchni niekonwencjonalnych, zwłaszcza na liniach dużych prędkości, związane jest z koniecznością przestrzegania bardzo ostrych wymagań technicznych i technologicznych. Zwłaszcza bardzo ważne jest spełnienie warun-

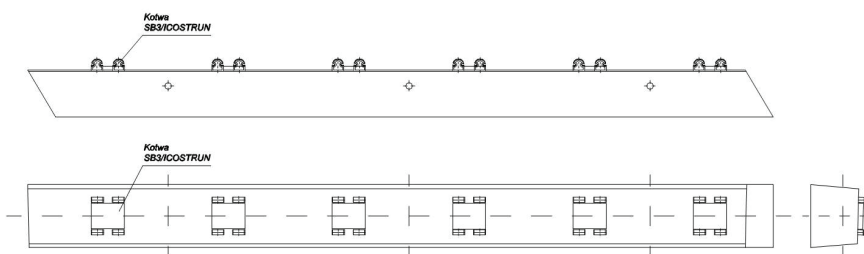
ków dotyczących jakości podtorza i podłoża gruntowego. Również niezwykle utrudnione jest usuwanie skutków ewentualnych awarii.

2. Prefabrykowane podkłady wzdłużne na podłożu asfaltobetonowym

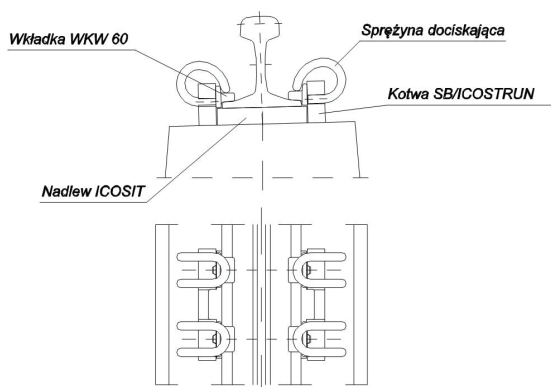
Zastosowanie prefabrykowanych podkładów wzdłużnych na podłożu asfaltobetonowym mogłoby stanowić atrakcyjną ofertę w stosunku do wielu typów nawierzchni niekonwencjonalnych, takich jak Rheda-2000, płyty MaxBögla, czy typu ERS i innych odmian tzw. nawierzchni płytowych, np. LVT.

Podkład wzdłużny typu WZA stanowi prefabrykowana belka żelbetowa lub strunobetonowa. W kolejnictwie stosowane są podkłady ramowe, natomiast podkłady wzdłużne znane są z zastosowań w tzw. lekkich systemach transportu szynowego, np. w torowiskach tramwajowych, gdzie posadowane są na warstwie tzw. chudego betonu. Idea zastosowania podkładów wzdłużnych w transporcie szynowym nie jest nowa, natomiast w podkładzie WZA zaproponowano dwa rozwiązania oryginalne:

- podkłady te przeznaczone są do posadwienia na warstwie asfaltu lub podsypki, a zatem będą inaczej projektowane,
- łączenie podkładów będzie wykonywane za pomocą materiałów elastycznych wysokiej jakości, przy czym końce podkładów są ukosowane.



Rys. 3. Schemat ogólny podkładu wzdłużnego WZA



Rys. 4. Schemat ogólny przytwierdzenia ICOSTRUN-03, przeznaczonego do zastosowania w podkładach wzdłużnych WZA

Przyjęte przytwierdzenie ICOSTRUN-03 jest modyfikacją przytwierdzenia ICOSTRUN-02, gdzie przyjęto podwójne pary łapek i podatną warstwę podszytą. Takie rozwiązanie powinno zapewnić wysoką wartość oporów wzdłużnych (np. przy hamowaniu awaryjnym), a także odpowiednią elastyczność podłoża szynowego, zwłaszcza przy posadowieniu podkładów na podłożu asfaltowym.

W odniesieniu do nawierzchni kolejowych, jako podłoże podkładów wzdłużnych można zastosować typowe konstrukcje drogowe typu ciężkiego (KR5, KR6), a w odniesieniu do linii metra i tramwajów – lżejsze typy nawierzchni, np. właściwe kategoriom ruchu KR3 i KR2.

3. Niekonwencjonalna nawierzchnia LONGASF

W typowych konstrukcjach niekonwencjonalnych eliminuje się warstwę podsypki (często także podkłady) zastępując te elementy nawierzchni płytą betonową (prefabrykowaną, np. konstrukcja Maxa Bögla) lub wylewaną na mokro (np. Rheda-2000). Płyty nawierzchniowe posadowione są na warstwie tzw. chudego betonu, a podłoże stanowi warstwa kruszywa i warstwa gruntu o odpowiedniej nośności. Zastosowanie betonu wymaga długiego okresu dojrzewania (zarówno w trakcie budowy jak i ewentualnych napraw).

Zastąpienie betonu cementowego przez asfaltobeton znacznie skraca czas budowy nawierzchni. Dlatego podbudowę nawierzchni LONGASF stanowi typowa konstrukcja drogi samochodowej, na podłożu o odpowiedniej nośności układana jest warstwa kruszywa stabilizowanego mechanicznie, na której układana jest warstwa asfaltobetonu (bez warstwy ścieralnej).

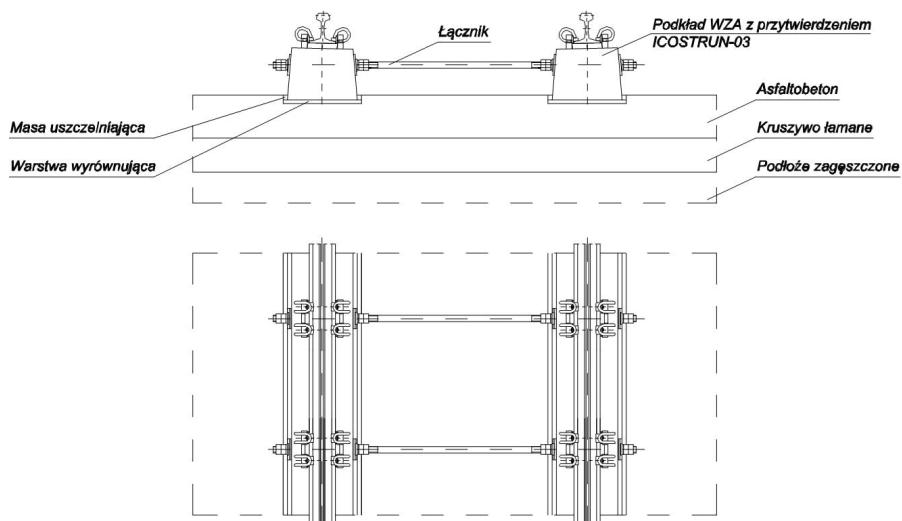
Asfaltobeton, o ile nie jest poddany znacznym działaniom termicznym, stanowi podłoże, które można bardzo szybko ułożyć oraz naprawić. Zazwyczaj – w odniesieniu do transportu kolejowego lub szerzej - szynowego - stosowane jest podłoże betonowe. Przy wylewaniu betonu na budowie wymagany jest długi okres dojrzewania. Nieliczne zastosowanie asfaltobetonu w kolejnictwie sprowadzają się do warstw ochronnych podłoża bądź to konstrukcji takich jak firmy Railtec, gdzie na podłożu asfaltobetonowym układa się ciężkie podkłady betonowe lub podkłady stalowe typu Y.

W odróżnieniu od prób wykorzystania podbudowy asfaltowej do układania podkładów poprzecznych, w konstrukcji LONGASF proponuje się zastosowanie podpory podłużnej, których szerokość jest tak dobrana, aby obciążenia przekazywane na powierzchnię asfaltobetonu nie były większe od obciążeń jednostkowych najcięższych samochodów.

Z uwagi na to, że nie ma możliwości uzyskania wyższej dokładności ułożenia asfaltu niż ± 1 cm, przewidziano zastosowanie warstwy wyrównawczej pod podporami wzdłużnymi. Podpory wzdłużne są połączone poprzecznie łącznikami stalowymi, a wzdłużnie warstwami elastycznymi.

W prefabrykowanych podporach wzdłużnych osadzone są gniazda przytwierdzeń (kotwy i nadlewy z materiału elastycznego). Przestrzeń pomiędzy podporami

wzdłużnymi obu toków szynowych oraz na zewnątrz podpór jest pokryta warstwą zasyпки (np. tłucznia kolejowego po recyklingu). Zadaniem zasyпки jest przede wszystkim izolacja termiczna warstwy asfaltobetonu, a ponadto zasyпка może pełnić funkcję stabilizacji położenia toru w kierunku poprzecznym. Istotę koncepcji pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Schemat ogólny nawierzchni LONGASF

4. Modele nawierzchni i ich analiza

W odniesieniu do nawierzchni typu LONGASF analizowano dwa modele fizyczne:

- 1) Model 3D, w którym - szyna, podkład wzdłużny, elementy przytwierdzenia oraz wszystkie warstwy podłoża są modelowane jako ciała sprężyste, scharakteryzowane parametrami: moduł Younga- E oraz współczynnik Poissona ν .
- 2) Model uproszczony [4], wykorzystywany w analizach dynamicznych:
 - szyna jako belka o rzeczywistych charakterystykach: sztywność zginania – EI_z (kierunek pionowy) oraz EI_y (kierunek poprzeczny), sztywność wzdłużna – EA , gdzie: E – moduł Younga stali szynowej, I_z , I_y – momenty bezwładności w kierunku pionowym i poprzecznym do osi szyny, A – pole powierzchni szyny,
 - przytwierdzenie: więź sprężysto-lepka lub nieliniowa charakterystyka,
 - podkład wzdłużny: belka, o charakterystykach jak szyna,
 - podłoże podkładu wzdłużnego: więź sprężysto-lepka, wyznaczona na podstawie danych doświadczalnych (dane uzyskane w badaniach laboratoryjnych i poligonowych, także w ramach niniejszego projektu rozwojowego),

- masa jednostkowa podłoża szynowego: masa podkładu wzdłużnego + masa stowarzyszona asfaltu i zasypki.

Wartości liczbowe parametrów modelu uproszczonego (parametry określone na podstawie badań laboratoryjnych[7]):

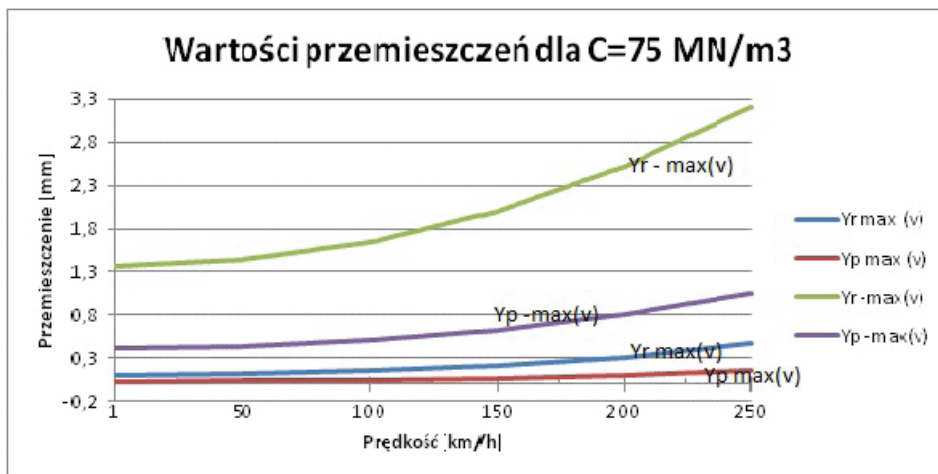
- nawierzchnia bezpodsytkowa z podkładami wzdłużnymi, przytwierdzenia ICOSTRUN-03 (rozstaw przytwierdzeń co 0,75 m),
- sztywność przytwierdzenia i współczynnik tłumienia wiskotycznego:
- kierunek poprzeczny: $k_r = 37 \text{ MN/m}$, $c_r = 3600 \text{ Ns/m}$;
- kierunek wzdłużny: $k_r = 46,8 \text{ MN/m}$, $c_r = 2600 \text{ Ns/m}$.
- kierunek pionowy: $k_r = 43,6 \text{ MN/m}$, $c_r = 1600 \text{ Ns/m}$
- inne parametry:
 - masa podkładu (pod jedną szyną, na 1 m) $m_p = 866 \text{ kg}$ i $866 + 225 = 1091 \text{ kg}$ (masa podkładu wraz ze stowarzyszoną masą asfaltu oraz dodatkowo z podsypką),
 - sztywność pionowa podbudowy, przy rozkładzie w asfalcie pod kątem 45 stopni: $U_b = 67,5, 90, 135 \text{ i } 180 \text{ MN/m}^2$ (MN/m na metr bieżący podkładu wzdłużnego), tłumienie zasypki z tłucznia i podłoża w kierunku pionowym, przypadające na 1 metr podkładu wzdłużnego: $c_{bj} = 49\,000 \text{ Ns/m}$ (inaczej: Ns/m^2),
 - sztywność w kierunku poprzecznym (na metr bieżący), czyli: $U_p = 10 \text{ i } 15 \text{ MN/m}^2$ (pierwsza wartość odpowiada sztywności pionowej 67,5 i 90, druga – 135 i 180), tłumienie podsypki i asfaltu (bardzo małe przemieszczenia), $c_{bj} = 5000 \text{ Ns/m}^2$,
 - parametry mechaniczne podkładu betonowego: $E_b = 35000 \text{ MPa}$, $\nu = 0,17$,
 - parametry geometryczne podkładu: pole przekroju poprzecznego: $A_b = 0,1125 \text{ m}^2$, momenty bezwładności: $I_z = 84375 \text{ cm}^4$, $I_y = 126633 \text{ cm}^4$.

Natomiast w odniesieniu do modelu 3D przyjęto standardowe stałe materiałowe (stal, beton, warstwa wyrównawcza, podłoże asfaltu), a w przypadku warstwy asfaltu przyjęto moduł Younga o wartości $E_a = 10\,000 \text{ MPa}$; jest to najniższa wartość modułu w przypadku, gdy temperatura asfaltu nie przekracza około 25 - 30 stopni, a utrzymanie tego zakresu temperatury gwarantuje zasypka o grubości około 30 cm.

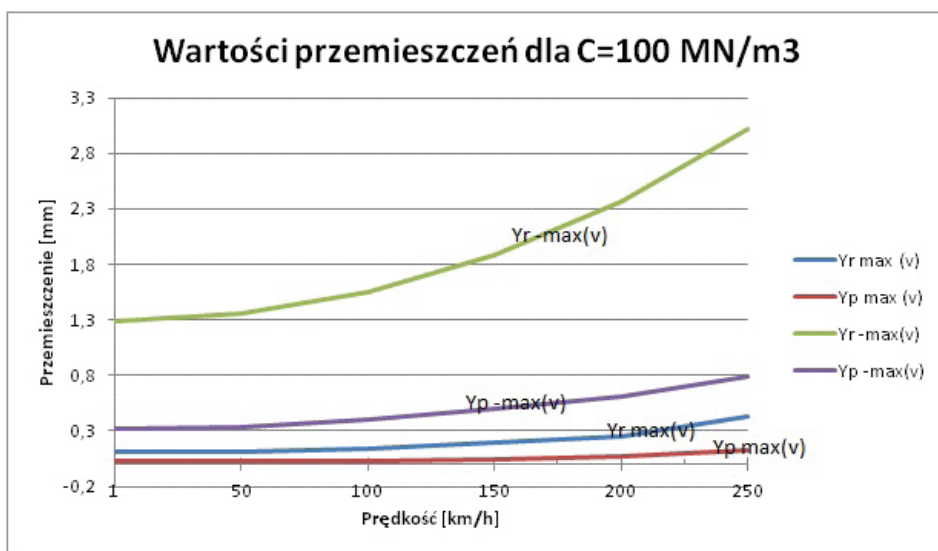
5. Uproszczony model teoretyczny analizy dynamicznej przy obciążeniu nieinercyjnym - analiza pracy nawierzchni w płaszczyźnie pionowej

Wyniki przeprowadzonych obliczeń pokazano na rys. 6–9. Przedstawiono na nich maksymalne ugięcia szyny i podkładów (skierowane w dół) oraz maksymalne wartości przemieszczeń, skierowane w górę (unoszenie) w przedziale modułu sztywności podłoża asfaltu 75 – 250 MN/m^3 . W przypadku nawierzchni bezpod-

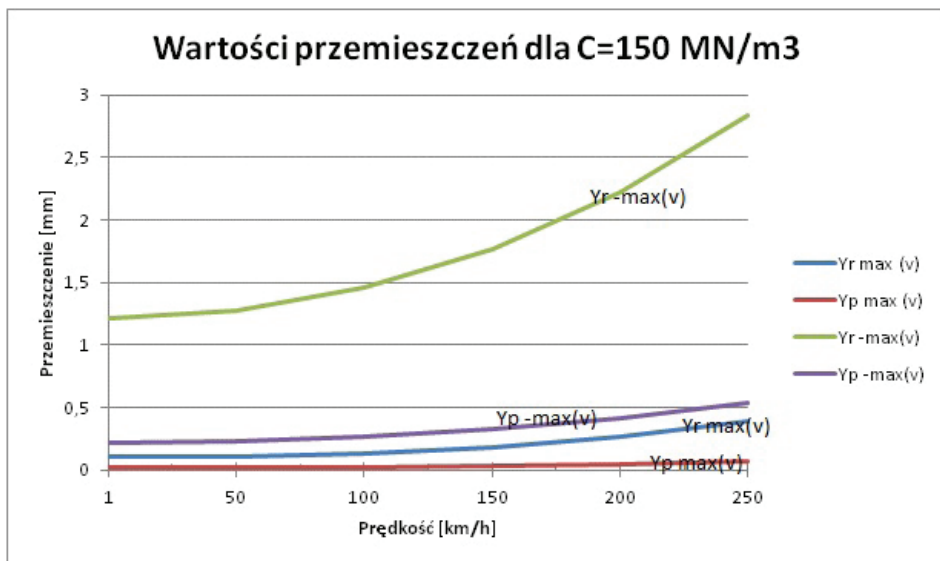
sypkowej unoszenie podkładów poniżej wartości 0,3 mm, można uznać za dopuszczalne i nie mające wpływu na stabilność ich położenia w trakcie eksploatacji, natomiast maksymalne ugięcia szyny poniżej 3 mm wskazują na konieczność doskonalenia konstrukcji, zwłaszcza przytwierdzenia.



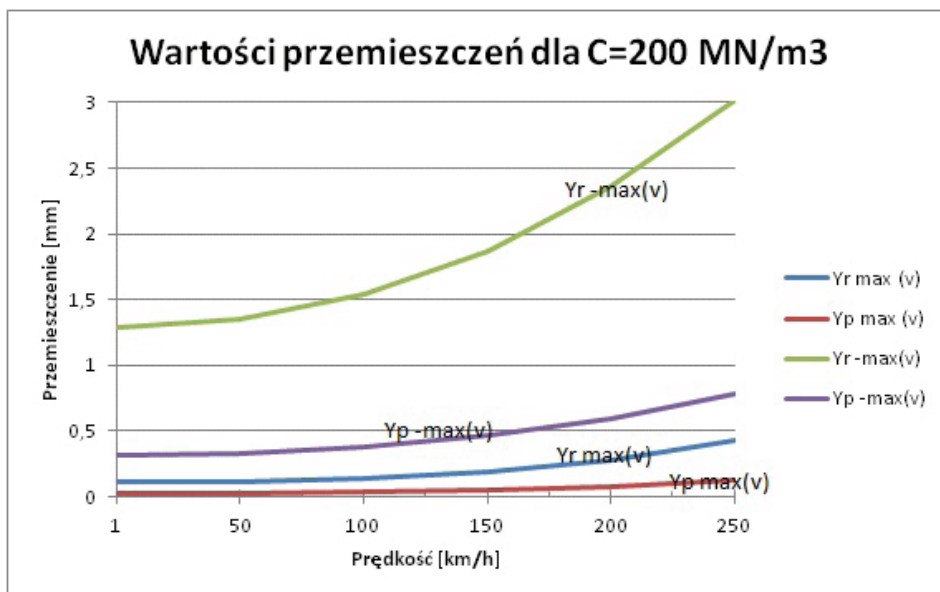
Rys. 6. Wartość przemieszczeń dla nawierzchni LONGASF z podkładami wzdużnymi, przytwierdzeniem ICOSTRUN-03 w zależności od prędkości pociągu dla $C = 75 \text{ MN/m}^3$



Rys. 7. Wartość przemieszczeń dla nawierzchni LONGASF z podkładami wzdużnymi, przytwierdzeniem ICOSTRUN-03 w zależności od prędkości pociągu dla $C = 100 \text{ MN/m}^3$



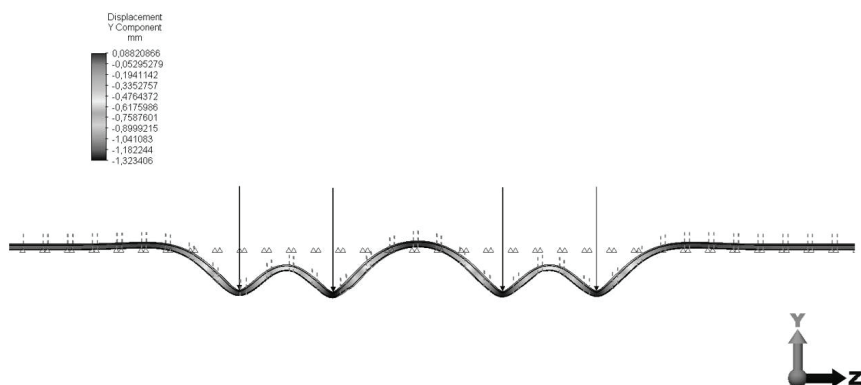
Rys. 8. Wartość przemieszczeń dla nawierzchni LONGASF z podkładami wzdłużnymi, przytwierdzeniem ICOSTRUN-03 w zależności od prędkości pociągu dla $C = 150 \text{ MN/m}^3$



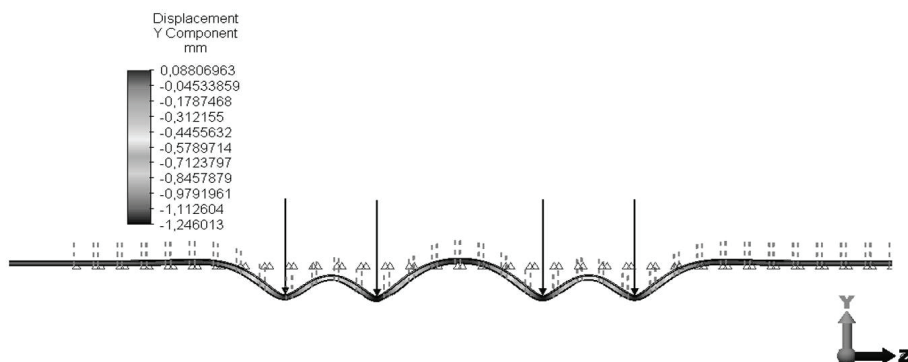
Rys. 9. Wartość przemieszczeń dla nawierzchni LONGASF z podkładami wzdłużnymi, przytwierdzeniem ICOSTRUN-03 w zależności od prędkości pociągu dla $C = 200 \text{ MN/m}^3$

6. Quasi statyczna analiza pracy nawierzchni i jej elementów przy użyciu modeli numerycznych (systemu Autodesk Simulation Multiphysics) - model 2D

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wariantów sztywności pionowej podłoża (131,5 i 196,9 kN/mm), przy stałej sztywności przytwierdzenia $k_r = 46,6$ kN/mm.

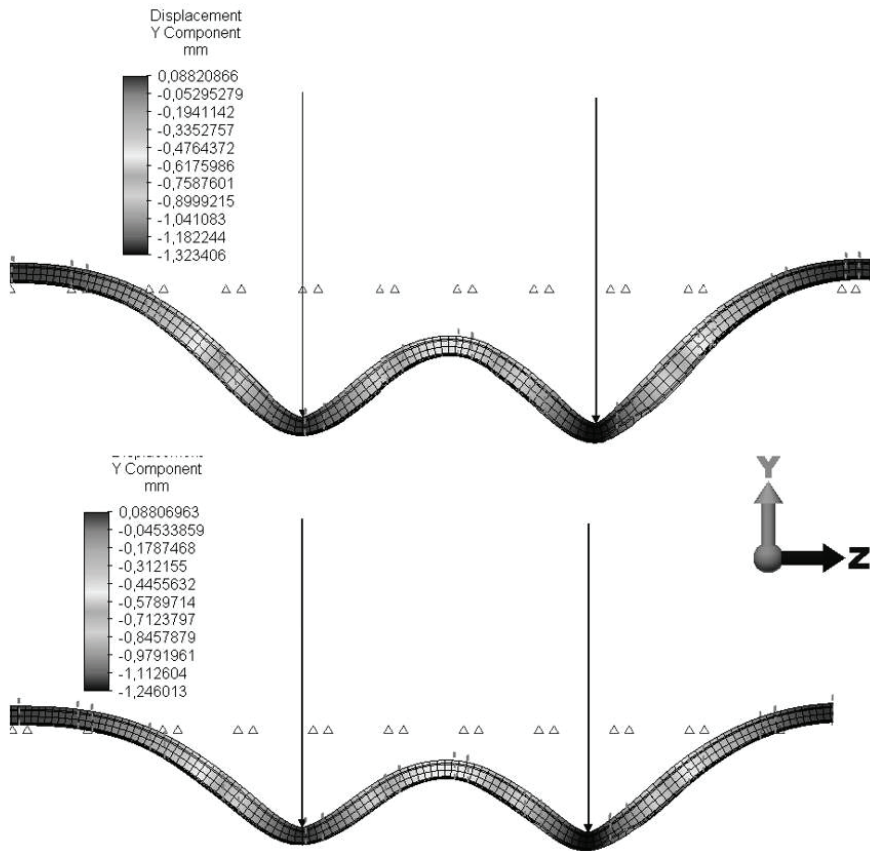


Rys. 10. Przemieszczenia pionowe dla $k_p = 131,25$ kN/mm



Rys. 11. Przemieszczenia pionowe dla $k_p = 196,9$ kN/mm

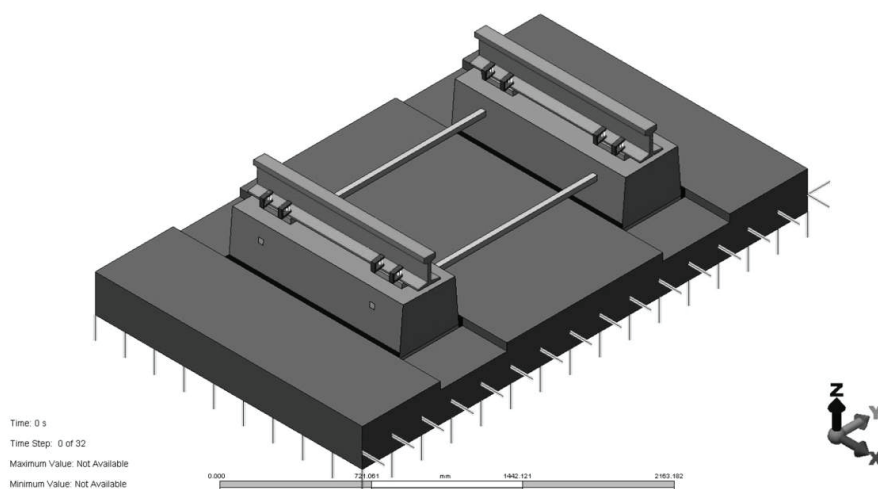
Porównując oba warianty dla różnego rodzaju posypki na rysunku 10 można zauważyć, że przemieszczenia pionowe osiągają maksymalną wartość dla $k_p = 131,25$ kN/mm równą 1,3234 mm, natomiast dla $k_p = 196,9$ kN/mm wynoszą 1,2460 mm.



Rys. 12. Porównanie przemieszczeń pionowych dla obu wariantów podsypki

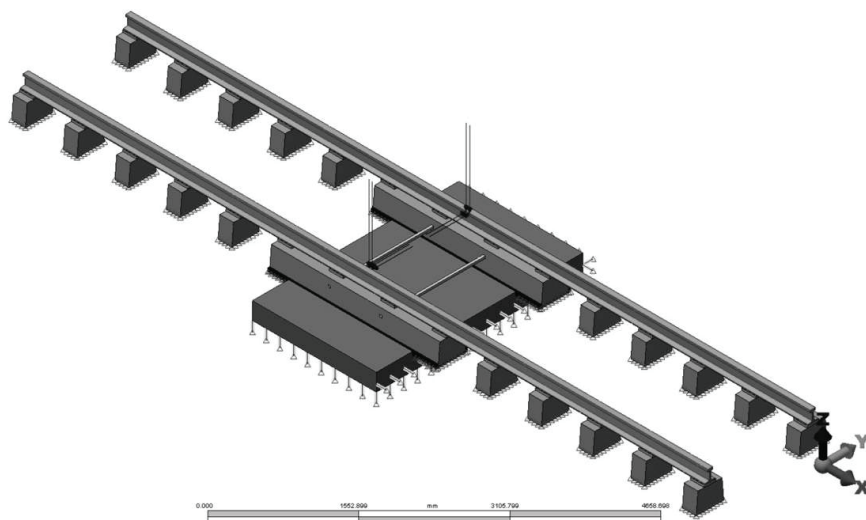
7. Model 3d nawierzchni

Model stworzony programem autodesk simulation multiphysics na podstawie modelu laboratoryjnego, składa się z elementów zastępczych typu 3d (brick), oraz siłownika (actuator), którego zadaniem jest dociśnięcie łapki przytwierdzenia. Podłoże gruntowe (pod warstwą asfaltu) modelowane jest przez element typu spring. Do obliczeń przyjęto bardzo słabe podłoże o współczynniku $C = 75 \text{ MN/m}^3$. W modelu pominięto zasypkę.

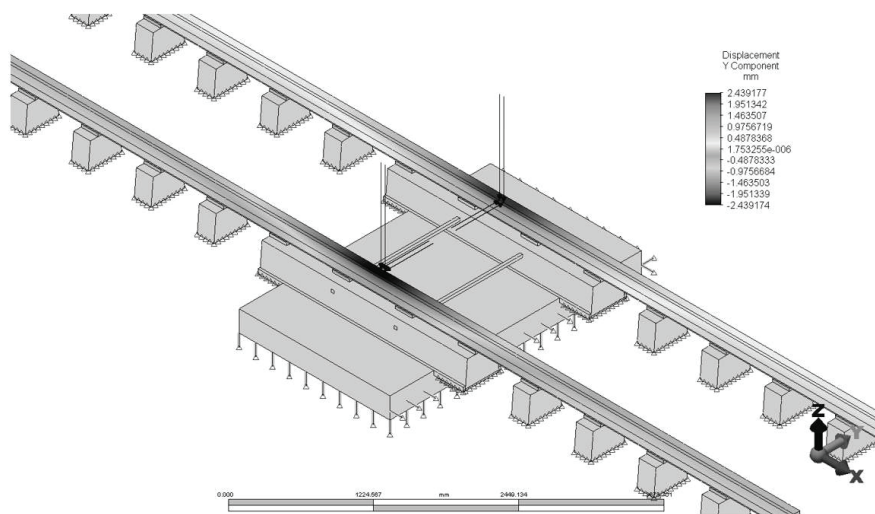


Rys. 13. Model nawierzchni stworzony w programie Autodesk Simulation Multiphysics

W celu uzyskania wpływu przytwierdzeń sąsiednich model został wydłużony, co przedstawiono na rysunku 14.

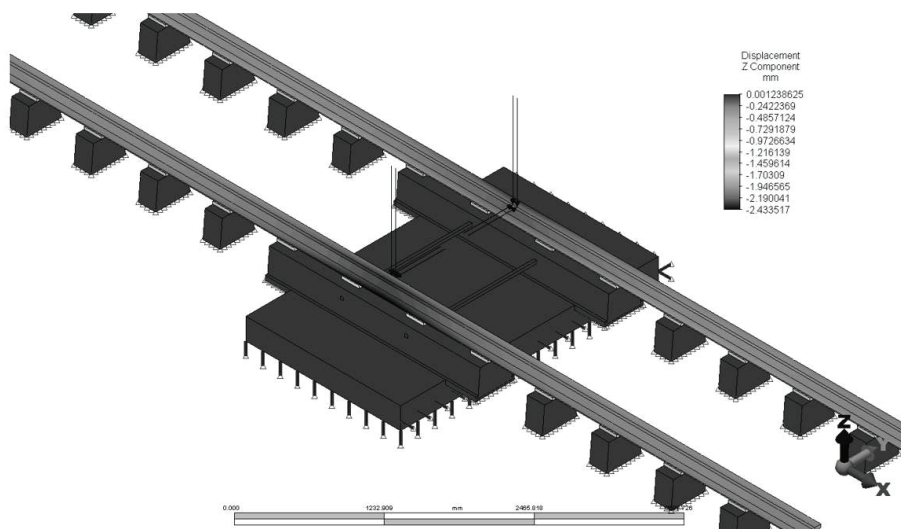


Rys. 14. Model wydłużony nawierzchni stworzony w programie Autodesk Simulation Multiphysics



Rys. 15. Przemieszczenia poziome modelu nawierzchni LONGASF

Maksymalne obliczone przemieszczenia poziome wynoszą 2,4392 mm.



Rys. 16. Przemieszczenia pionowe modelu nawierzchni LONGASF

Maksymalne obliczone przemieszczenia pionowe wynoszą 2,4335 mm.

Uzyskane wyniki pokazują, że przy bardzo słabym podłożu przemieszczenia pionowe i poziome nawierzchni typu LONGASF nie przekroczą wartości około 2,5 mm.

8. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych i symulacji komputerowych należy stwierdzić, że badany typ nawierzchni wykazuje cechy wysokiego standardu eksploatacyjnego.

Nawierzchnia LONGASF jest szczególnie przydatna na liniach dużej prędkości, choć przemieszczenia pionowe przy prędkości powyżej 200 km/h są zbyt duże - wymaga to doskonalenia konstrukcji, zwłaszcza przytwierdzenia.

Z pełnego zakresu badań opisanych w sprawozdaniu merytorycznym z realizacji projektu rozwojowego „Nawierzchnia kolejowa o podwyższonym standardzie i zmniejszonym oddziaływaniu na środowisko” [7], wynika ponadto, że nawierzchnia LONGASF jest również przydatna do zastosowania na liniach, gdzie występuje wiele łuków poziomych oraz jest bardzo odporna na hamowanie ciężkich pociągów towarowych i może być zastosowana na liniach o dużych naciskach osi.

Bibliografia

- [1] Basiewicz T, Gołaszewski A., Towpik K., Nawierzchnia kolejowa z kompozytem tłuczniowym, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Politechnika Warszawska, Warszawa 2010.
- [2] Darr E., Fiebig W., Feste Fahrbahn - Eurapress, Tetzlaff-Hestra Verlag, 2008.
- [3] Basiewicz T, Gołaszewski A., Towpik K., Ocena celowości zastosowania nawierzchni niekonwencjonalnej na liniach dużych prędkości w warunkach polskich kolei. Politechnika Warszawska. Zakład Infrastruktury Transportu, Praca Statutowa, Warszawa 2006.
- [4] Czyczuła W., Tor bezstykowy, Politechnika Krakowska. Kraków, 2002.
- [5] Norma BN-64/8931-02 Drogi samochodowe, oznaczenie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą.
- [6] Skrzyński E., Diagnostyka podtorza. Problemy Kolejnictwa, zeszyt Nr 115, Warszawa 1987.
- [7] Czyczuła W. i wsp., Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu rozwojowego „Nawierzchnia kolejowa o podwyższonym standardzie i zmniejszonym oddziaływaniu na środowisko” (nr projektu: NR10-0004-10/2010), Kraków 2013.

Publikacja powstała w ramach projektu rozwojowego „Nawierzchnia kolejowa o podwyższonym standardzie i zmniejszonym oddziaływaniu na środowisko” (nr projektu: NR10-0004-10/2010) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.