

PODŁOŻE TORU NA LINIACH KOLEI DUŻYCH PRĘDKOŚCI (KDP)¹

Tadeusz Basiewicz

prof. dr hab. inż., Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Wydział Transportu

Andrzej Gołaszewski

dr inż., Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Wydział Transportu

Jacek Kukulski

dr inż., Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Wydział Transportu, e-mail: jkukul@wt.pw.edu.pl

Kazimierz Towpik

prof. dr hab. inż., Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Wydział Transportu, e-mail: kto@wt.pw.edu.pl

Streszczenie. *W artykule przedstawiono specyfikację współpracy pojazdu kolejowego z torem na liniach dużych prędkości. Omówione zostały również zagadnienia dotyczące podłoża kolejowego na liniach konwencjonalnych podsypkowych jak i na nawierzchniach niekonwencjonalnych. W artykule podano wyniki badań nawierzchni z warstwą podsypki zbrojonej geosiatkami oraz stabilizowanej żywicą. Przedstawiono wyniki oceny stanu toru na odcinkach doświadczalnych CMK.*

Słowa kluczowe: *nawierzchnia kolejowa, kompozyt tłuczniowy, geosiatka, stabilizacja chemiczna, KDP*

1. Wstęp

Na świecie eksploatuje się obecnie ponad 15 000 km linii dużych prędkości, ponad 8 000 km jest w budowie, a blisko 19 000 km linii jest w fazie planowania lub projektowania. W 2025 r. łączna długość linii KDP na świecie osiągnie prawdopodobnie ponad 50 000 km.

W specyfikacji TSI dotyczącej infrastruktury kolei dużych prędkości [7] różni się: nowe linie kolejowe kategorii I, przeznaczone do prowadzenia ruchu z prędkościami ≥ 250 km/h, linie kolejowe kategorii II, przystosowane w wyniku modernizacji do prędkości 200 km/h oraz linie kolejowe kategorii III - nowe lub przystosowane do dużych prędkości, na których występują jednakże miejscowe ograniczenia prędkości.

Wprowadzanie dużych prędkości wymagało i wymaga rozwiązywania wielu złożonych technicznie zagadnień. Jednym z takich problemów jest zapew-

¹ Wkład procentowy poszczególnych autorów: Basiewicz T. 25%, Gołaszewski A. 25%, Kukulski J. 25%, Towpik K. 25%

nienie podłoża toru, umożliwiającego prowadzenie ruchu z prędkościami 250 – 320 km/h. Przy tak znacznych prędkościach występują bowiem zjawiska, których nie obserwuje się w nawierzchni i podtorzu linii konwencjonalnych.

2. Specyfika współpracy pojazdu z torem przy dużych prędkościach jazdy

Wielkość i charakter oddziaływań między pojazdami a nawierzchnią i podtorzem zależą od konstrukcji pojazdów, prędkości jazdy, a także od cech konstrukcyjnych nawierzchni i podtorza oraz stanu utrzymania, zarówno pojazdów jak i nawierzchni. Nawierzchnię i podtorze charakteryzują: sprężystość konstrukcji (określana na podstawie pomiaru odkształceń toru pod obciążeniem), tłumienie konstrukcyjne oraz charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe opisujące dynamiczną reakcję konstrukcji na oddziaływania pojazdów.

Dla eksploatacji infrastruktury drogi kolejowej, w tym również budowli inżynierskich związanych z torem, istotne są takie czynniki, jak: dynamiczne zachowanie się taboru i warunki współpracy koła z szyną, wielkości sił wywieranych na konstrukcję nawierzchni oraz podtorze, a także zjawiska aerodynamiczne pojawiające się przy dużych prędkościach przejazdu pociągów (zmiany ciśnienia, hałas aerodynamiczny, wywiewanie podsypki, drgania gruntu w sąsiedztwie obiektów infrastruktury itp.). Głównym czynnikiem decydującym o wielkości oddziaływań dynamicznych jest jednak sztywność podłoża szyny [2, 3].

Specyfikacje TSI [8] odnoszące się do kolei dużych prędkości wyróżniają tabor klasy 1 przeznaczony do jazdy z prędkością co najmniej 250 km/h. Pociągi tej klasy to zespoły trakcyjne mające stały skład, własny napęd oraz kabiny maszynisty na obu końcach. Tabor klasy 2, który może obejmować obok zespołów trakcyjnych także pociągi o zmiennym składzie, jest przeznaczony do jazdy z prędkościami 190-250 km/h.

Tabor ten musi wykazywać odpowiednią skuteczność hamowania, również na pochyleniach. Określona jest również maksymalna długość pociągu (400 m) i jego masa (do 1000 ton). Wartość sił dynamicznych wywieranych przez koło pojazdu na szynę nie może przekraczać 180 kN przy prędkościach 200-250 km/h, 170 kN przy prędkościach 250-300 km/h oraz 160 kN przy większych prędkościach jazdy.

Doświadczenia wyniesione z eksploatacji KDP wykazały, że konieczne jest również ograniczenie pionowych nacisków kół pojazdu w zależności od dopuszczalnej prędkości jazdy (170 kN przy prędkościach powyżej 250 km/h i 180 kN dla prędkości do 250 km/h).

3. Podłoże torunawierzchni klasycznej na liniach dużych prędkości

Klasyczna nawierzchnia kolejowa jest obecnie eksploatowana na wielu liniach dużych prędkości (między innymi na liniach TGV we Francji). Jej konstrukcja nie

ulega poważniejszym zmianom. Warstwa podsypki będąca jednym z elementów nawierzchni pracuje w zakresie elastoplastycznym, co między innymi prowadzi w czasie eksploatacji do odkształceń trwałych i różnicowania charakterystyk sprężystości i tłumienia na długości toru, stwarzając konieczność regulacji położenia toru i niezbędnych napraw nawierzchni. Przy dobrym stanie podtorza udział podsypki w odkształceniach toru sięga 80-90% [9].

W warunkach coraz większych prędkości jazdy wskutek mikrouderzeń kół z dużymi częstotliwościami wyraźnie wzrosła liczba zmęczeniowych uszkodzeń szyn. Drgania szyn są również powodem zwiększonych przyspieszeń łożysk osiowych pojazdów i w konsekwencji zauważalnego wzrostu sił dynamicznych. Prócz tego obserwuje się zwiększone przyspieszenia drgań podkładów, podsypki i podtorza. Na warstwę podsypki działają przyspieszenia kilkakrotnie przewyższające przyspieszenie ziemskie. Za ich sprawą w pewnych obszarach podsypka podlega naprężeniom rozciągającym, które zanikają dopiero na głębokości 600, 800 mm. Pojawia się zjawisko rozluźnienia podsypki [1].

Odpowiednia sztywność pionowa nawierzchni klasycznych na liniach KDP nie przekracza zazwyczaj 150 MN/m (taką na przykład przyjęto dla nowej linii RENFE między Kordobą i Malagą). Uzyskuje się ją przez odpowiedni dobór elementów nawierzchni. W razie potrzeby w celu zmniejszenia sztywności można dodatkowo układać pod warstwą podsypki maty SBM (*SubBallastMats*).

Na wcześniej eksploatowanych liniach KDP z klasyczną nawierzchnią na przeważającej ich długości występuje podtorze gruntowe. Podtorza takiego nie traktuje się jako obiektu mającego spełniać warunki interoperacyjności. Musi jednak spełniać wymagania dotyczące sztywności i wytrzymałości, a jego górne warstwy powinny być zabezpieczone przed oddziaływaniem zwiększonych drgań. Ważne jest zapewnienie równomierności osiadania toru w trakcie eksploatacji. Należy również pamiętać, że w warunkach linii KDP prędkość rozchodzenia się w gruncie fal powierzchniowych (fal Rayleigha) powinna być nie mniejsza niż 150 m/s [9]. Krytyczna prędkość tych fal, zależna od rodzaju ośrodka gruntowego, może decydować o konieczności ograniczenia prędkości pociągów.

4. Nawierzchnie niekonwencjonalne na liniach dużych prędkości

Począwszy od lat osiemdziesiątych w europejskich zarządach kolejowych przy projektowaniu lub modernizowaniu linii kolejowych przyjęto jako zasadę wymiarowanie całego podłoża toru, z uwzględnieniem prócz warstwy podsypki również warstw pośrednich. W zależności od warunków klimatycznych i gruntowo-wodnych oraz dostępnych technologii stosowano różnego rodzaju warstwy ochronne i filtracyjno-ochronne.

Opracowanie zasad wymiarowania nawierzchni kolejowej mającego na celu zapewnienie odpowiedniej sztywności konstrukcji i uwzględniającego geotechniczną

i hydrologiczną klasę gruntu podtorza, umożliwiło wprowadzenie na kolejach europejskich określonych standardów konstrukcyjnych.

Szybka rozbudowa sieci KDP na świecie ujawniła tendencję do stopniowego eliminowania podtorza gruntowego. Pojawiła się ona już przy budowie pierwszych linii dużych prędkości powstających w Japonii. Na liniach Tohoku i Joetsu długość torów ułożonych na mostach i estakadach przekroczyła 70%. Na niedawno ukończonej linii HSL w Holandii tory posadowiono w ok. 85% na konstrukcjach budowli inżynierskich z nawierzchnią niekonwencjonalną, a tylko w 15% na podtorzu ziemnym (rys. 1).



Rys. 1. Widok toru z nawierzchnią niekonwencjonalną na linii dużych prędkości w Holandii

Źródło: fot. A.Massel

W nawierzchni niekonwencjonalnej podłoże toru powinno być wykonane z materiałów o wytrzymałości umożliwiającej pracę konstrukcji w zakresie odkształceń sprężystych. Projektuje się ją w ten sposób, że każdy kolejny, niżej położony element ma mniejszą sztywność od poprzedniego. Konstrukcja niekonwencjonalna składa się najczęściej z *nawierzchni właściwej* (szyny, przytwierdzenia, podkładu stanowiącego punktowe podparcie szyny lub szyny na płycie betonowej, betonowej warstwy nośnej lub warstwy stabilizowanej hydraulicznie) oraz z *podłoża* obejmującego warstwy ochronne, w tym górną warstwę mrozoochronną oraz niezwiązaną warstwę gruntu zagęszczonego lub niesortu spoczywającą na gruncie rodzimym.

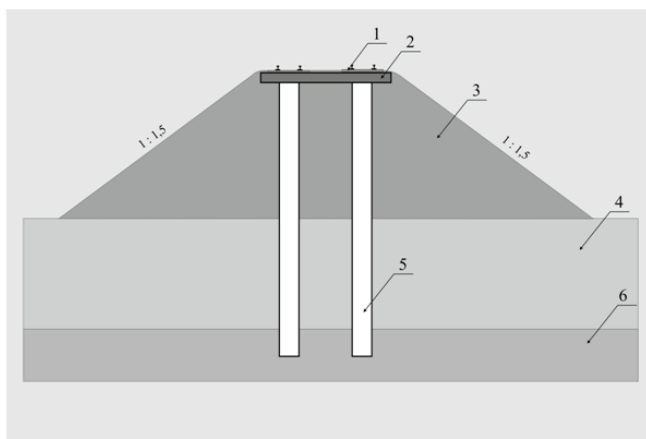
Z licznych rozwiązań konstrukcyjnych nawierzchni bezpodsytkowych, wymienić należy nawierzchnie typu: Rheda 2000, Bögl i Getrac.

W nawierzchni Rheda 2000 podkłady dwublokowe układane są razem ze zbrojeniem, a następnie betonowana jest płyta (ok. 240 mm) na miejscu budowy. Po związaniu podkłady oraz płyta betonowa tworzy jedną zintegrowaną całość. W przypadku wykonania nawierzchni na powierzchni ziemnej, układa się również na podtorzu hydraulicznie związaną warstwę chudego betonu (ok. 300 mm). Nawierzchnia tego typu charakteryzuje się dobrą statecznością położenia toru, niewrażliwością na działanie sił podłużnych (pojawiających się, na przykład w skutek ogrzania szyn prądami wirowymi przy hamowaniu), dużą trwałością konstrukcji (60 lat). Mniejsze są również koszty utrzymania w porównaniu z nawierzchnią klasyczną, pomimo tego, że nawierzchnia bezpodsypkowa jest układana na zróżnicowanym podłożu (mosty, tunele, podtorze ziemne, podłoże rozjazdów).

Na liniach KDP przygotowanie podłoża gruntowego pod nawierzchnie niekonwencjonalne wymaga wykonania licznych badań właściwości gruntu i oceny jego nośności. W celu uzyskania wymaganych modułów odkształcenia stosuje się dodatkowe zagęszczanie, stabilizację gruntu (np. cementem), a nawet jego wymianę. Trzeba podkreślić, że budowa nawierzchni bezpodsypkowych na podtorzu ziemnym wymaga dobrego odwodnienia i przestrzegania warunków wymaganej nośności górnej warstwy właściwie zagęszczonego gruntu.

Nie spełniają tych warunków nasypy o wysokości powyżej 10 m oraz głębokie przekopy wykonywane w gruntach spoistych (na przykład łąkach) i gruntach podatnych na osiadanie przy zawilgoceniu (lessy, gipsy).

W przypadku występowania gruntów plastycznych można stosować pale, na przykład pale CFG (*cement-flyash-gravel*) wykonywane za pomocą świdrów ślimakowych z mieszaniny cementu, lotnych popiołów i żwiru, przechodzących przez warstwę plastyczną aż do gruntu o odpowiedniej nośności. Właściwa kontrola przebiegu iniekcji cementowej zapobiega ryzyku odkształcenia pali, a ich wprowadzanie możliwe jest także w pobliżu istniejących budowli. Niekiedy nawierzchnie niekonwencjonalne układa się bezpośrednio na palach (rys. 2).



Rys. 2. Posadowienie nawierzchni niekonwencjonalnej bezpośrednio na palach

Oznaczenia: 1 – szyna, 2 – konstrukcja nawierzchni bezpodsypkowej, 3 – nasyp, 4 – warstwa gruntów plastycznych, 5 – pale, 6 – warstwa gruntu o wymaganej nośności

Układanie nawierzchni bezpodсыpkowych na mostach zwiększa wymagania co do dokładności wykonawstwa robót, urządzeń srk, instalacji elektrycznych oraz dopuszczalnych oddziaływań wibroakustycznych. Na mostach o rozpiętości mniejszej niż 25 m (zwłaszcza o konstrukcji ramowej oraz pozbawionych łożysk) nawierzchnie bezpodсыpkowe układa się bez przerw, na całej długości mostu, a między nawierzchnią i pomostem umieszcza maty, np. STM (*Slab TrackMats*) oraz warstwę utwardzanego tworzywa piankowego, w celu dostosowania sztywności nawierzchni do sztywności konstrukcji mostu.

Na mostach o rozpiętości ponad 25 m konstrukcja nawierzchni bezpodсыpkowej powinna być przytwierdzana do konstrukcji mostu. Najczęściej między pomostem i nawierzchnią układa się warstwy elastomeru z wypustami zapobiegającymi przemieszczeniom poziomym.

Szczególną uwagę należy zwracać na odcinki przejściowe w miejscach, gdzie następuje zmiana sztywności podparcia toru, a często także występuje zróżnicowane osiadanie. Najczęściej takie odcinki wykonuje się pomiędzy budowlą ziemną a mostem, tunelem lub przepustem [6]. Ich zadaniem jest wyrównanie sztywności pionowej dla uniknięcia skutków zwiększonych dynamicznych oddziaływań (efektu progowego) oraz zapewnienia jednolitego osiadania toru podczas eksploatacji.

5. Podłoże toru na linii dużych prędkości w Polsce

Na liniach PKP eksploatuje się obecnie nawierzchnie o klasycznej konstrukcji z warstwą podсыpki. W wyniku decyzji podjętej w 2008 r. rozpoczęto w Polsce projektowanie nowej linii dużych prędkości, która ma połączyć Warszawę przez Łódź z Poznaniem i Wrocławiem. Budowa nowej linii będzie powiązana z modernizacją kilku istniejących linii, przede wszystkim Centralnej Magistrali Kolejowej. Wiąże się to z koniecznością podejmowania decyzji o wyborze typu nawierzchni oraz wykonania niezbędnych napraw istniejącego lub też budowy nowego podtorza kolejowego odpowiadającego warunkom linii dużych prędkości. Trudno obecnie przesądzać, jaka konstrukcja nawierzchni będzie układana na nowej linii. Dobór jej elementów powinien jednakże zapewniać odpowiednią sprężystość i tłumienie całej konstrukcji, istotne również ze względu na oddziaływania wibroakustyczne pociągów dużych prędkości.

Jest niezwykle istotne, aby nawierzchnia nowej linii była układana na właściwie przygotowanym podtorzu. Niedotrzymanie tego warunku prowadzi w eksploatacji do zakłóceń w ruchu i do zwiększonych kosztów utrzymania. Podobne stwierdzenia zawarto we wnioskach konferencji w Jeleniej Górze, poświęconej podtorzu [10]. Zwrócono uwagę na potrzebę stosowania nowych technologii i rozwiązań umożliwiających ograniczenie oddziaływań wibroakustycznych kolei, stosowania kolumn żwirowych i żwirowo-betonowych, stabilizacji gruntów, geowłóknin separacyjnych pod warstwą ochronną oraz zapewnienia właściwej sztywności górnej warstwy podtorza.

Jedną z prób poszukiwania rozwiązań zwiększających odporność konstrukcji nawierzchni klasycznej było ułożenie na Centralnej Magistrali Kolejowej odcinka doświadczalnego z nawierzchnią kompozytową [1]. Odcinek podzielono na sektory oraz działki.

Na odcinku ułożona została nawierzchnia z kompozytem tłuczniovym stanowiącym warstwę tłucznia uzbrojoną geosiatkami różnych producentów i w kilku wariantach dodatkowo powierzchniowo stabilizowaną chemicznie (schemat odcinka doświadczalnego pokazano na rys. 3).

Nawierzchnia	Szlina UIC 60 (60E1) Podkład PS 94 przytwierdzenie SB												
Kilometr	170,875	171,275	171,675	172,150	172,175	172,575	172,975	173,325	173,325	174,025	174,050	175,050	
	1275 m			1150 m			700 m		1000 m				
	400 m	400 m	475 m	400 m	400 m	350 m							
Podsyпка	2 siatki Fornit (40x40)	2 geow. Comtrac I Fortrac	2 siatki Tensar (TX160, SSLA30)	2 siatki Fornit (40x40)	2 geow. Comtrac I Fortrac	2 siatki Tensar (TX160, SSLA30)	BEZ SIATEK BEZ INIEKCJI ODCINEK PORÓWNAWCZY		ODCINEK PORÓWNAWCZY				
	Z ŻYWICĄ MC - Ballastbond			BEZ ŻYWICY MC - Ballastbond									
Podtorze	Podtorze istniejące bez wzmocnienia			Wzmocnienie górnej warstwy podtorza warstwą gr. 30 cm niesort fr 0-31.5						Podtorze istniejące z warstwą niesortu		Podtorze istniejące	
Działki	I 1	I 2	I 3	II 1	II 2	II 3	III		IV				
	SEKTOR I			SEKTOR II			SEKTOR III		SEKTOR IV				

Rys. 3. Odcinek doświadczalny nawierzchni z kompozytem tłuczniovym zbudowany na CMK w 2008 roku

Badania położenia geometrycznego toru podczas eksploatacji poprzedzono analizą wyników pomiarów zebranych podczas kontroli jakości wykonywania poszczególnych czynności związanych z budową toru na odcinku doświadczalnym [2].

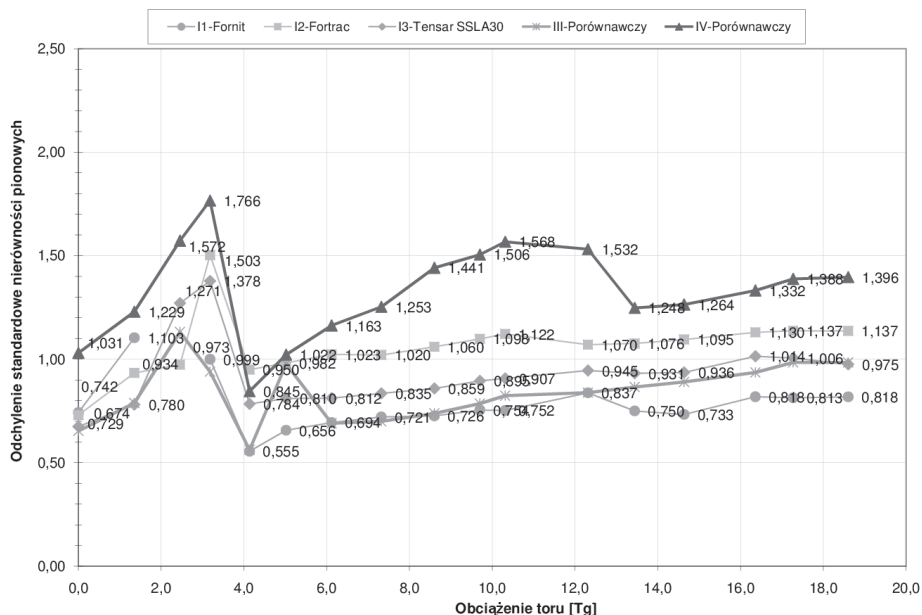
Zasadniczym celem pomiarów geometrycznego położenia toru na odcinkach z nawierzchnią z kompozytem tłuczniovym była ocena odkształcalności tej nawierzchni w czasie eksploatacji i porównania z nawierzchnią o klasycznej konstrukcji.

Ogólna ocena położenia geometrycznego toru na odcinkach doświadczalnych dokonana na podstawie pomiarów bezpośrednich toromierzem samorejestrującym, pomiarów geodezyjnych oraz pomiarów drezyną EM 120 wykazała, że tor po zakończeniu robót odpowiadał warunkom określonym dla prędkości jazdy 200 km/h.

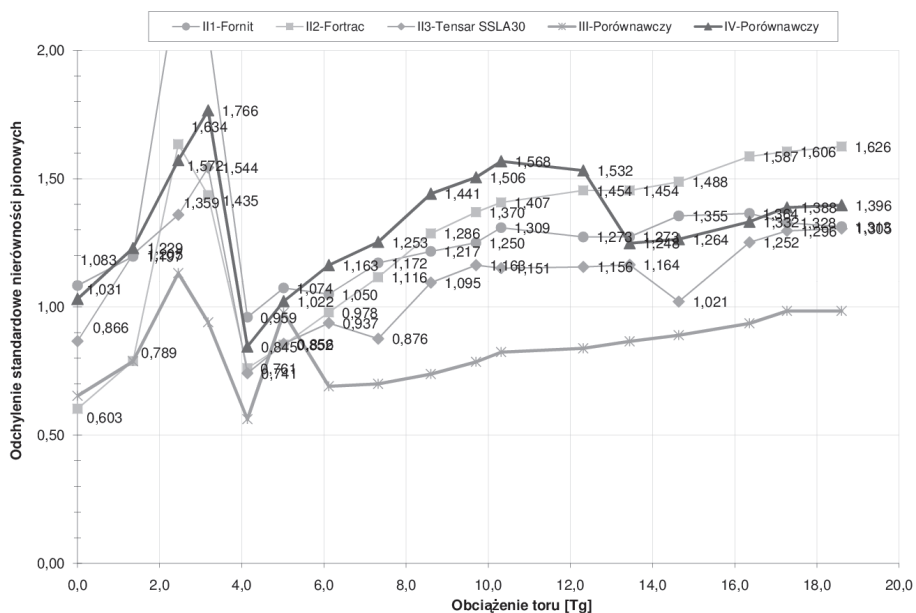
Do oceny odkształcalności nawierzchni wykorzystano wyniki pomiarów objazdów drezyną EM-120, wykonanych w okresie obserwacji odpowiadającym przeniesieniu przez nawierzchnię obciążenia ponad 18 Tg.

Zmiany obliczonych wartości odchyłek standardowych nierówności pionowych i poziomych toru pośrednio charakteryzują odkształcenia konstrukcji. Zwiększenie wartości odchyłek nierówności pionowych toru wskazuje na wzrost nadwyżek dynamicznych oddziaływań pojazdów, a odkształceń poziomych informuje pośrednio o odporności toru na przemieszczenia poprzeczne.

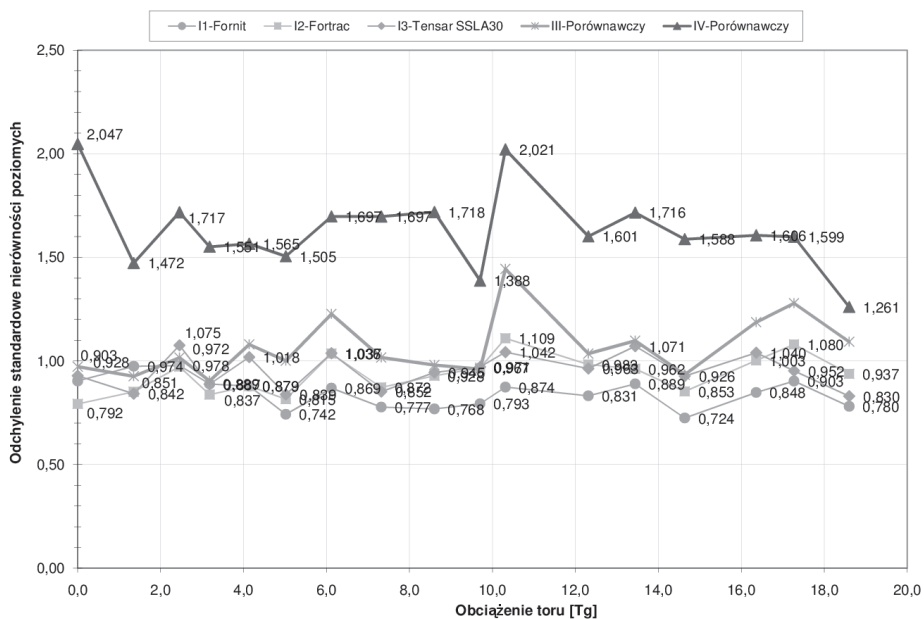
Dla okresu objętego analizą zestawiono wartości odchyłeń standardowych nierówności pionowych i poziomych (rys. 4 i 5) dla toru sektora I, gdzie warstwę podsypki uzbrojono geosiatkami oraz odpowiednio dla sektora II (rys. 6 i 7), gdzie dodatkowo wykonano również chemiczną stabilizację podsypki.



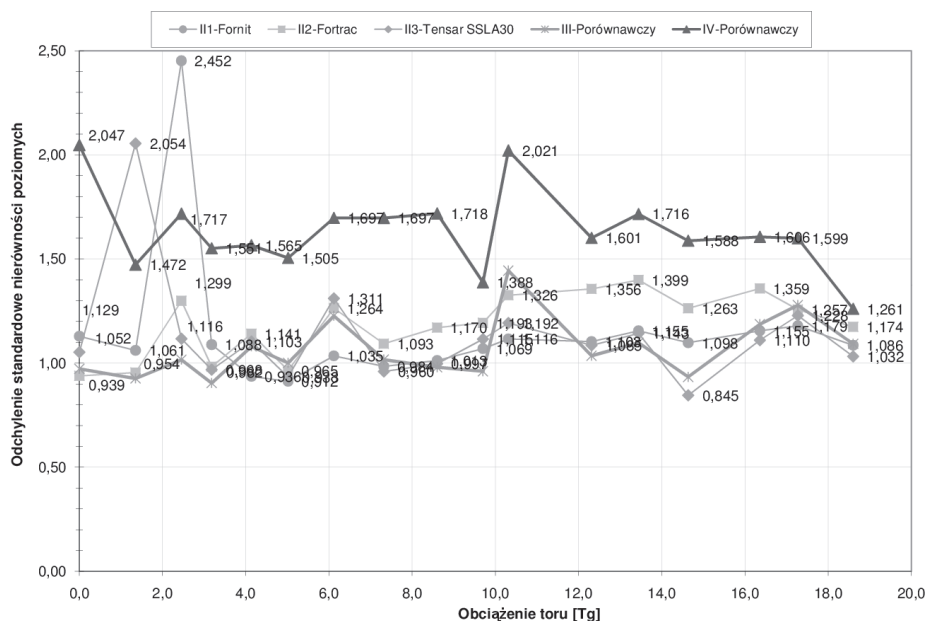
Rys. 4. Zmiany wartości odchyłeń standardowych nierówności pionowych dla sektora I



Rys. 5. Zmiany wartości odchyłeń standardowych nierówności poziomych dla sektora I



Rys. 6. Zmiany wartości odchyień standardowych nierówności pionowych toru dla sektora II



Rys. 7. Zmiany wartości odchyień standardowych nierówności poziomych dla sektora II

Analizując wykresy można sądzić, że dla przypadku zbrojenia podsypki geosiatkami nie obserwuje się zmniejszenia nierówności pionowych toru, a znacznie

lepszy efekt może dać ułożenie dodatkowej warstwy niesortu. Zastosowanie geosiatek może natomiast wpłynąć korzystnie na zachowanie położenia toru w płaszczynie poziomej.

Dodatkowa stabilizacja chemiczna podsypki wzmocnionej geosiatką przynosi efekt zbliżony do tego, jaki uzyskuje się w przypadku zastosowania warstwy niesortu, uzyskując przy tym widoczną poprawę odporności toru na boczne odkształcenia.

Wyniki obserwacji oraz ocenę zmian położenia toru na odcinku doświadczalnym należałoby naszym zdaniem wykorzystać przy wyborze rozwiązań przeznaczonych dla linii dużych prędkości polskich kolei.

W świetle dotychczasowych doświadczeń można stwierdzić, że układanie konstrukcji bezpodsypkowych jest trudne na łukach i na krzywych przejściowych. Zaletą tych konstrukcji jest jednak korzystniejszy z uwagi na skrajnię budowli przekrój poprzeczny linii, co ma znaczenie zwłaszcza w przypadku tuneli i obiektów mostowych. Uzyskuje się porównywalną dokładność położenia toru, a nakłady na utrzymanie są znacznie mniejsze. Jednakże możliwość regulacji położenia toru jest ograniczona, a usunięcie skutków ewentualnej awarii lub wykolejenia wymaga znacznie dłuższego czasu niż w przypadku nawierzchni klasycznej. Budowa nawierzchni bezpodsypkowych wymaga ponadto stosowania zaawansowanych technologii i dużej dokładności robót.

Bibliografia

- [1] Basiewicz T., Gołaszewski A., Kukulski J., Towpik K., Nawierzchnia kolejowa z kompozytem tłuczniowym - badania i prognozowanie narastania nierówności toru w eksploatacji. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej INFRASZYN 2012, Zakopane 2012.
- [2] Bałuch H., Badawcze aspekty przygotowań do wprowadzenia w Polsce dużych prędkości pociągów [w:] Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie, Kraków 2008.
- [3] Bałuch H., Bałuch M., Determinanty prędkości pociągów – układ geometryczny i wady toru. Wydawnictwo Instytutu Kolejnictwa, Warszawa 2010.
- [4] Darr E., Fiebig W., FesteFahrbahn. VDEI Schriftenreihe, Eurailpress 2008.
- [5] Design of new lines for speeds of 300–350 km/h. State of the art, Report UIC, Paris 2009.
- [6] Frühauf W., Jungwirth J., Scholz M., Röder A., Stoiberer H., Systemy szynowe na płycie montowane na obiektach inżynierskich, Przegląd Komunikacyjny 9-10/2010.
- [7] HS TSI Infrastruktura, Dz.Urz. UE nr L 77 z 19.03.2008.

- {8} HS TSI Tabor, Dz. Urz. UE nr L 84 z 26.03.2008.
- {9} Skrzyński E.: Podtorze kolejowe, KOW, Warszawa 2010.
- {10} Wnioski z IV Konferencji „Problemy budowy i naprawy podtorza kolejowego, Jelenia Góra 2012.

