

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Towpik  
Politechnika Warszawska  
Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu

# LINIE KOLEJOWE DUŻYCH PRĘDKOŚCI

## SPIS TREŚCI

1. Wstęp
2. Linie dużych prędkości (LDP) na świecie
3. Wymagania dotyczące projektowania i eksploatacji linii dużych prędkości
4. Układ geometryczny linii kolejowych dużych prędkości
5. Program budowy linii dużych prędkości w Polsce
6. Podsumowanie

## STRESZCZENIE

*W artykule opisano rozwój linii dużych prędkości (LDP) na świecie, ze szczególnym uwzględnieniem infrastruktury tych linii. Scharakteryzowano wymagania dotyczące interoperacyjności i kompatybilności LDP, doboru elementów nawierzchni klasycznych i niekonwencjonalnych eksploatowanych na tych liniach, oddziaływań pojazdów na nawierzchnię oraz środowisko naturalne. Omówiono również parametry układu geometrycznego oraz wymagania dotyczące jakości położenia torów na liniach dużych prędkości. Przedstawiono program budowy LDP w Polsce.*

## 1. WSTĘP

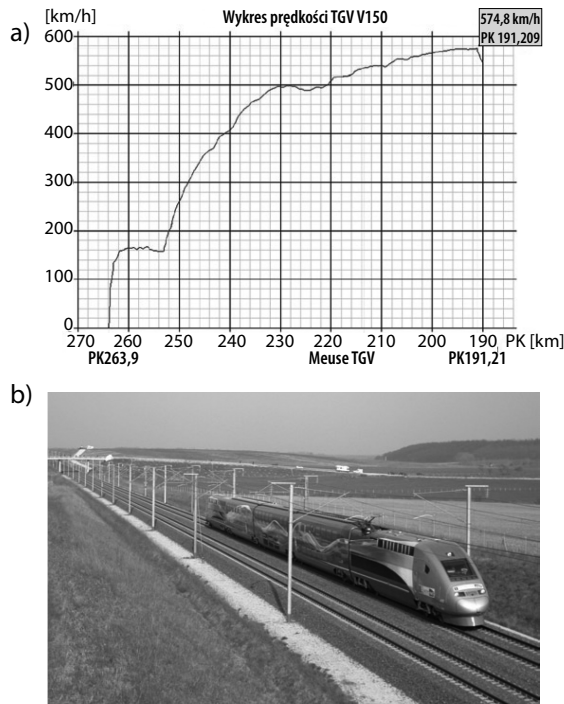
Dążenie do osiągania w ruchu kolejowym coraz większych prędkości towarzyszy rozwojowi kolei od samych jej początków. Począwszy od 1835 r., gdy na odcinku linii Norymberga – Führt osiągnięto prędkość 24 km/h, bito kolejne rekordy prędkości; na przykład w 1935 r. osiągnięto 200,4 km/h na linii Hamburg – Berlin (parowóz z 4 wagonami), a w 1938 r. – 201 km/h na linii London and North Eastern (parowóz z 27 wagonami).

Do 1964 r. prędkości zwykłych pociągów nie przekraczały 160 km/h (np. już w 1933 r. osiągnięto tę prędkość na linii Berlin – Hamburg, a w latach 1936–1939 na trasie Wrocław – Opole – Kędzierzyn Koźle – Gliwice) [30].

Po upowszechnieniu się trakcji spalinowej i elektrycznej poszczególne koleje dążyły do osiągania kolejnych spektakularnych rekordów prędkości. W 1987 r. brytyjski ICE 125

osiągnął 238,1 km/h na linii Darlington – York, a w 1988 r. koleje niemieckie pobiły światowy rekord prędkości na odcinku nowej linii Fulda – Würzburg, osiągając 406 km/h [8]. W dwa lata później koleje francuskie ustanowiły nowy rekord – 515,3 km/h – podczas jazdy po jednej z linii TGV [2].

W wyniku realizacji programu badawczego „Francuska doskonałość w budowie pociągów bardzo dużej prędkości”<sup>1</sup>, w którym uczestniczyły Alstom, SNCF i RFF<sup>2</sup>, w dniu 3 kwietnia 2007 r. pobito rekord prędkości na linii TGV Est na odcinku długości 140 km, na wysokości Passavant – Argonne. Osiągnięto prędkość 574,8 km/h podczas jazdy pociągu doświadczalnego TGV V150. Tor na odcinku testowym miał pochylenie podłużne 35‰ w kierunku jazdy. Zespół o długości 100 m i masie 268 t składał się z dwóch wagonów silnikowych POS i trzech wagonów doczepnych piętrowych typu *Duplex* (rys. 1). Podczas jazd doświadczalnych badano własności aerodynamiczne pociągu, jego stateczność i dynamikę wózków, współpracę kół z konstrukcją nawierzchni, współpracę pantografu z siecią oraz samą sieć [30, 31]. Dla linii istniejącego układu, po którym kursują tradycyjne składy pociągów prowadzone przez lokomotywy, jako graniczną przyjmuje się prędkość 200 km/h.



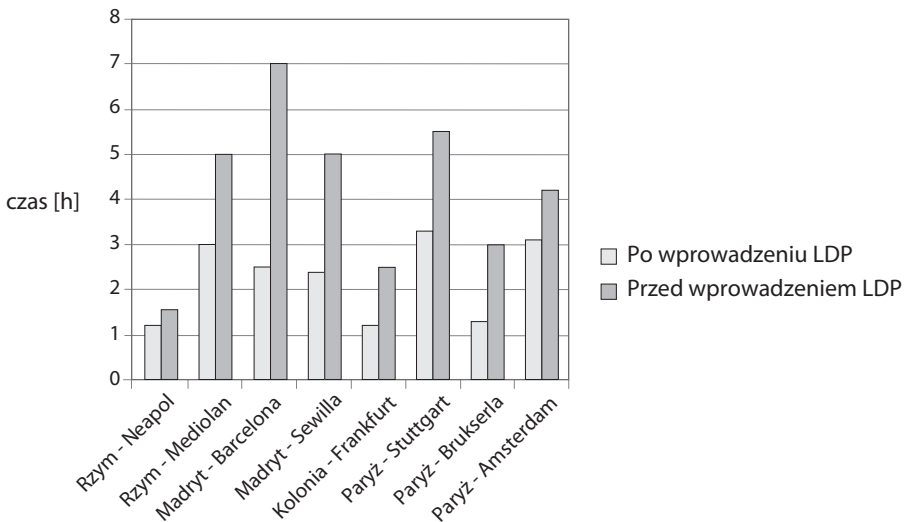
Rys. 1. Osiągnięcie prędkości 574,8 km/h przez pociąg doświadczalny na odcinku linii TGV Est: a) wykres prędkości, b) widok jednostki TGV [35]

<sup>1</sup> *Excellence Française de la Très Grande Vitesse.*

<sup>2</sup> *Réseau Ferré de France.*

Przesłankami do podejmowania budowy linii dużych prędkości były zazwyczaj: niezadowalający czas przejazdu, zbyt mała zdolność przewozowa istniejących linii, a także potrzeba rozbudowy istniejącej sieci kolejowej. Na pytanie, czy wzrost prędkości ruchu osiągnąć przez koleje związany jest głównie z doskonaleniem technicznej infrastruktury linii kolejowych, a zwłaszcza z rozwojem konstrukcji nawierzchni kolejowej, należałoby odpowiedzieć przecząco. Postęp w zakresie dużych prędkości, a więc prędkości przekraczających 200–250 km/h, jest wynikiem równoczesnego doskonalenia konstrukcji pojazdów szynowych (zastąpienie konwencjonalnych pociągów pociągami zespolonymi), a zwłaszcza pojazdów trakcyjnych, doskonalenia elementów infrastruktury drogi kolejowej – szczególnie systemów kontroli i bezpieczeństwa ruchu pociągów (ze względu na sterowanie ruchem przy prędkościach ponad 160 km/h wymagana jest już sygnalizacja kabinowa), jak również wprowadzania zmian w organizacji ruchu pociągów.

W warunkach ostrej konkurencji z innymi rodzajami transportu istotne jest osiągnięcie coraz większych rozkładowych prędkości pociągów. Obecnie pod tym względem pierwsze miejsce zajmują koleje japońskie (316,8 km/h), na dalszych miejscach znajdują się SNCF (259,4 km/h), RENFE (209,1 km/h), DB (190,4 km/h) i BR (182,8 km/h). Pociągi kwalifikowane polskich kolei osiągają średnią prędkość techniczną ok. 130 km/h. Dla pasażera istotny jest czas przejazdu, stąd znaczenie prędkości handlowej. Według [4] najmniejszy rozrzut prędkości handlowych (średnio 32,3 km/h) obserwuje się przy maksymalnych prędkościach rzędu 200 km/h, największy natomiast przy 300 km/h (średnio 83,7 km/h). Rozbudowa sieci linii dużych prędkości umożliwiła znaczne zmniejszenie czasu dojazdu do głównych europejskich miast (rys. 2).



Rys. 2. Zmniejszenie czasów przejazdu pomiędzy ważniejszymi aglomeracjami w wyniku rozbudowy LDP [według UIC]

Duże prędkości rozkładowe udało się osiągnąć w znacznej mierze dzięki udoskonaleniu konstrukcji pojazdów kursujących po liniach sieci dużych prędkości. Postęp w tej dziedzinie dobrze obrazuje rozwój taboru kolei japońskich. Początkowo eksploatowane sześć- i ośmioczlone jednostki serii 0 o naciskach osi 160 kN i masie 967 ton, mające 6 do 8 odbieraków prądu, poruszały się z prędkością 210 km/h. Ich droga hamowania wynosiła 4100 m. Jednostki te zostały zastąpione przez jednostki serii 100, przystosowane do prędkości 230 km/h. Czołom pojazdów nadano aerodynamiczny kształt, zmniejszono ich masę do 922 ton oraz wyposażono w elektromagnetyczne hamulce działające na zasadzie prądów wirowych. Jednostki kolejnej serii 300, sześcioczłone, przeznaczone do jazdy z prędkością 300 km/h, mają masę zmniejszoną do 710 ton oraz mniejszy przekrój poprzeczny. Wyposażono je tylko w dwa odbieraki prądu. Kursujący od marca 1994 r. pociąg *Nozomi* jeździł z prędkościami rozkładowymi rzędu 270 km/h, pokonując odległość między Tokio i Hakatą (1069 km) w czasie 5 godzin i 3 minut. Wprowadzenie do normalnej eksploatacji jednostek serii 500 i 700 umożliwiło zwiększenie prędkości rozkładowych do 285–300 km/h. Osiąganie tak dużych prędkości łączy się z doskonałą organizacją ruchu, zapewniającą niespotykany w innych zarządach kolejowych poziom bezpieczeństwa, niezawodności i punktualności (rys. 3).



Rys. 3. Widok pociągu kolei japońskich ( seria 700 – wynik optymalizacji konstrukcji pojazdu) [41]

Wprowadzanie dużych prędkości wymaga rozwiązywania wielu złożonych technicznie zagadnień z zakresu:

- konstrukcji pojazdów szynowych,
- współdziałania pojazdu z torem i siecią trakcyjną,
- zjawisk aerodynamicznych i oddziaływania pojazdów szynowych na środowisko,
- wymiarowania nawierzchni klasycznej oraz opracowania nowych, niekonwencjonalnych konstrukcji nawierzchni.

Obserwowany postęp dokonuje się za sprawą ciągłej optymalizacji istniejących układów linii dużych prędkości. Obejmuje zarówno działalność badawczą, jak również rozwój infrastruktury i pojazdów szynowych, stymulując zarazem rozwój technologii przemysłu pracującego na potrzeby kolei.

W Europie dalszy rozwój kolei dużych prędkości wymaga współpracy UIC z takimi organizacjami, jak CER i UNIFE oraz podejmowania wspólnych inicjatyw zmierzających do integracji kolejowego systemu Europy. Przykładem może być „Misja Wschód – Zachód”

(*Mission Est – Ouest*) podjęta przez grupę dwunastu kluczowych przedsiębiorstw kolejowych, wspierających proces integracyjny związany z korytarzami paneuropejskimi. Jej celem jest poszukiwanie rozwiązań skracających czas postoju pociągów na przejściach granicznych (*Action Border Crossing*) oraz inicjatyw CEEC w zakresie ochrony środowiska, usprawnienia usług i rezerwacji, skrócenia czasu przejazdu między największymi miastami itp. UIC współdziała również z europejskim przemysłem kolejowym (UNIFE), tworząc wspólny organ odpowiedzialny za interoperacyjność kolei (AEIF). Należy oczekiwać przejścia przez nowe linie niektórych przewozów towarowych, dalszego zwiększenia interoperacyjności w transporcie szynowym, a ze strony przemysłu – zastosowania nowych technologii zwiększających komfort i bezpieczeństwo podróżowania oraz ograniczających zużycie energii.

Na świecie w 2010 r. długość linii dużych prędkości wyniosła 9887 km, w budowie było 8295 km, w planowaniu i projektowaniu 18 753 km.

## 2. LINIE DUŻYCH PRĘDKOŚCI (LDP) NA ŚWIECIE

### 2.1. Historyczny rozwój LDP

Pierwszym zarządem kolejowym, który w roku 1964 rozpoczął eksploatację linii dużych prędkości, były koleje japońskie, a pierwszą linią w Europie umożliwiającą osiągnięcie prędkości 200 km/h była włoska *Direttissima* łącząca Rzym z Florencją.

We Francji studia nad układem linii dużych prędkości rozpoczęto w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Doprowadziły one do określenia następujących warunków, jakim te linie powinny odpowiadać:

- przeznaczenie wyłącznie do ruchu pociągów pasażerskich,
- eksploatacja jedynie taboru o specjalnej konstrukcji (jednostki TGV),
- kompatybilność z istniejącymi liniami kolejowymi,
- dworce nowych linii lokalizowane w centralnych częściach miast,
- odległości między punktami zatrzymywania się jednostek TGV rzędu 200–800 km.

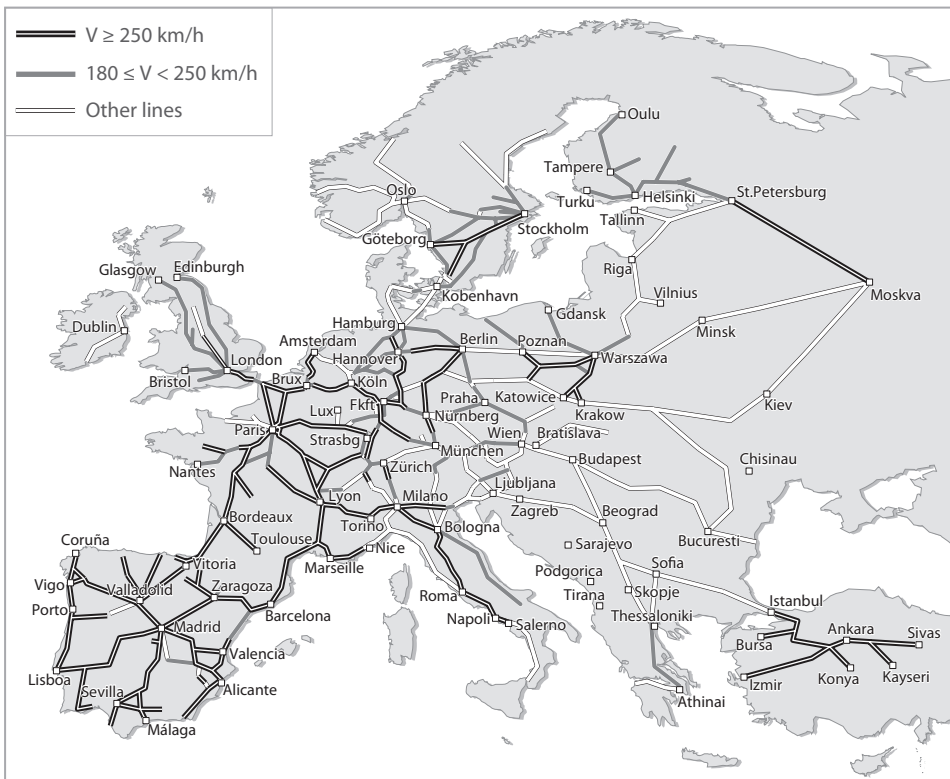
Również w Niemczech powstał już w latach sześćdziesiątych program budowy linii dużych prędkości, jako jedno z zadań programu modernizacji całej sieci DB [27]. W programie prowadzono obszerne badania dynamiki systemu pojazd – tor przy prędkościach 300 km/h [31]. Pierwsze pociągi ICE zaczęły kursować w 1991 r. z prędkością 250 km/h na liniach Hanower – Würzburg i Mannheim – Stuttgart. Zwrócono szczególną uwagę na bezpieczeństwo, punktualność i wygodę podróżowania. Między innymi, przyjęto jednąkową na wszystkich stacjach wysokość peronów – 0,76 m, poszerzono drzwi wejściowe wagonów i zapewniono wysoki poziom obsługi podróżnych na nowo wybudowanych dworcach. Ustalono, że prędkość pociągów powinna odpowiadać połowie prędkości samolotu i być co najmniej dwukrotnie większa niż w wypadku zwykłego pociągu pasażerskiego. Kierunki rozwoju sieci ICE wskazują, że koleje niemieckie drogą dalszych

innowacji technicznych zamierzają podwyższyć standard podróżowania, ograniczyć zużycie energii elektrycznej, eliminować stosowanie materiałów zagrażających środowisku oraz wprowadzać inteligentne systemy sterujące procesami utrzymania.

W Hiszpanii w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku nakreślono program modernizacji około 3500 km linii kolejowych, którego celem było zwiększenia prędkości jazdy w przewozach pasażerskich [30].

Koleje brytyjskie zbudowały połączenie Londynu przez Stratford, Ebbsfleet i Ashford z terminalem w Folkestone. Umożliwiło to skrócenie o 20 minut czasu przejazdu z Londynu do Paryża. Przystąpiono również do projektowania i budowy linii dużych prędkości łączących Londyn ze środkową i północną Anglią. Linia HS2 ma łączyć Londyn z Birmingham [9].

Prace nad europejską siecią dużych prędkości zainicjowano w 1983 r. Projekt początkowo ograniczał się do połączenia Paryż – Bruksela – Kolonia – Amsterdam, jednak po wejściu w życie porozumienia AGC określono ostateczną strukturę sieci. W 1989 r. przystąpiono do opracowania jej koncepcji ze wskazaniem roku 2010 jako terminu zakończenia budowy. Sieć ta miała obejmować (rys. 4):



Rys. 4. Europejska sieć linii dużych prędkości – stan prognozowany na rok 2025 [41]

- nowe linie przeznaczone do ruchu pasażerskiego prowadzonego z prędkością co najmniej 250 km/h (ok. 9000 km);
- linie istniejące przystosowane do prędkości 200 km/h, na których może odbywać się także ruch z mniejszą prędkością (ok. 15 000 km),
- linie z ruchem pasażerskim i towarowym, umożliwiające powiązanie wymienionych wcześniej w sieć funkcjonującą jako całość (ok. 15 000 km).

Linie dużych prędkości powstają również na innych kontynentach. W Australii projektuje się budowę linii długości 220 km łączącej Sydney z Canberrą w systemie TGV, na której prowadzony będzie ruch z prędkością do 320 km/h. W Stanach Zjednoczonych powstają nowe linie przeznaczone dla szybkiego ruchu pasażerskiego, na przykład tzw. korytarz północno-wschodni pomiędzy Waszyngtonem, Nowym Jorkiem i Bostonem, gdzie na linii długości 780 km ruch odbywa się już obecnie po 4 torach. W Teksasie powstaje nowa linia przeznaczona do ruchu z prędkością 350 km/h. Na Tajwanie zbudowano linię długości 345 km, łączącą miasta Taipei i Kaohsing, a w Korei Południowej nową linię dużych prędkości w systemie TGV, przystosowaną do prędkości 350 km/h. Obszerny program budowy linii dużych prędkości realizują koleje chińskie.

## 2.2. Charakterystyka ważniejszych systemów LDP i ich infrastruktury

### 2.2.1. Koleje japońskie

W Japonii powstały pierwsze na świecie linie dużych prędkości [12]. Zapoczątkowało je uruchomienie 1 października 1964 r. przewozów na linii *Tokaido* z Tokio do Osaki [30]. Pierwsza część normalnotorowej linii *Tokaido Shinkansen* o długości 515 km została zelektryfikowana w systemie 2AC 60 Hz, 25kV. Projektowana do prędkości 250 km/h, prowadziła ruch z prędkościami rozkładowymi 210 km/h [3]. W marcu 1985 r. wprowadzono prędkość 240 km/h na linii *Tohoku Shinkansen*, a w 1990 r. prędkość 275 km/h na odcinku linii *Joetsu Shinkansen* (rys. 5) [41].

Infrastrukturę linii *Tokaido* charakteryzują następujące parametry:

- minimalne promienie łuków poziomych 2500 m,
- rozstaw torów 4,20 m,
- 16 stacji rozmieszczonych na linii co ok. 43 km, z peronami o wysokości 1,32 m,
- nawierzchnia klasyczna, początkowo z szynami o masie 50,3 kg/m, a następnie z szynami o masie 60,8 kg/m,
- przebieg trasy w 53% na nasypach i w przekopach, w 11% na mostach, w 13% w tunelach i w 23% na estakadach,
- rozjazdy umożliwiające jazdę na kierunek zwrotny z prędkościami do 70 km/h, mające krzyżownice z ruchomymi dziobami,
- sieć trakcyjna zawieszona na wysokości 5,00 m, z miedzianym przewodem jezdnym o średnicy 170 mm<sup>2</sup>.



Rys. 5. Linie dużych prędkości w Japonii [41]

Następną linię – *Sanyo I* – przystosowaną do maksymalnej prędkości 300 km/h, o długości 164 km, zaczęto eksploatować w marcu 1972 r. Połączyła ona Osakę z Okayamą. Rozmieszczono na niej tylko 5 stacji. Linia przebiega w 7% długości na nasypach i w przekopach ziemnych, w 12% na mostach, w 45% na estakadach i w 36% w tunelach. Na linii ułożono ok. 8 km nawierzchni niekonwencjonalnej (na betonowych płytach). W roku 1975 zaczęła się eksploatacja 398 km linii *Sanyo II* łączącej miasta Okayama i Hakata. Trasa w 14% długości przebiega na nasypach lub w przekopach, w 8% na mostach, w 22% po estakadach i aż w 56% w tunelach. Najdłuższy tunel przed stacją Hakata ma 19 km. Projektując układ linii przyjęto jako minimalny promień 4000 m. Rozstaw torów zwiększono do 4,30 m. Nawierzchnię niekonwencjonalną ułożono już na 69% długości linii.

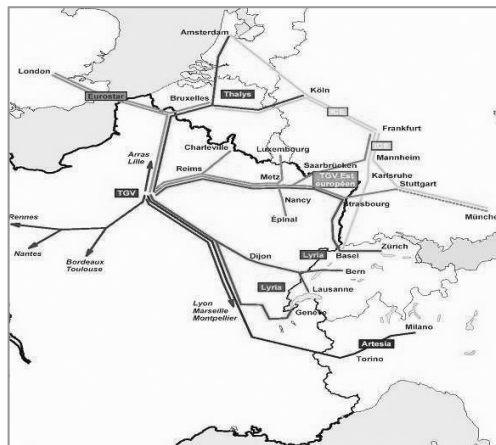
Kolejne linie: *Tohoku* Tokio – Morioka o długości 470 km z 16 stacjami oraz *Joetsu* Tokio – Niigata (270 km z 9 stacjami) zaczęto eksploatować odpowiednio w czerwcu i listopadzie 1982 r. Pierwsza z nich przebiega w 6% na nasypach i w przekopach, w 15% na mostach, w 55% po estakadach i w 24% w tunelach. Tylko na 10% długości linii występuje nawierzchnia klasyczna z warstwą podsypki. Na drugiej z wymienionych linii nie występuje w ogóle podłoże gruntowe, a tory ułożono w 11% na konstrukcjach mostowych, w 50% na estakadach i w 39% w tunelach. Nawierzchnia klasyczna występuje na 6% długości linii. Prędkości maksymalne na obu liniach wynoszą 275 km/h [18].

### 2.2.2. Koleje francuskie

Pierwszy odcinek linii TGV oddano do eksploatacji w 1981 r., drugi w 1983 r. (rys. 6). Linia *Paris Sud-Est* (LN1) o długości 412 km połączyła Paryż z Lyonem przez Dijon, a więc



obsługuje najbardziej obciążony ruchem kierunek we Francji. Zaprojektowano ją do maksymalnej prędkości 300 km/h. Prowadziła początkowo ruch z prędkościami rozkładowymi 213 km/h. W 1987 r. ukończono odcinek linii TGV *Atlantique* (LN2) długości 280 km, łączący dworzec Paris Montparnasse z Le Mans przez Tours. Linie zaprojektowano do prędkości 330 km/h i osiągnięto na niej średnią prędkość techniczną równą 220 km/h. W roku 1987 rozpoczęto również budowę linii TGV *Nord Europe* (LN3) łączącej Paryż z Lille, a następnie z Brukselą i Londynem. Zaprojektowano ją do prędkości 350 km/h. Jest to pierwszy odcinek europejskiej sieci, w obrębie której czas przejazdu z Paryża do Londynu, Brukseli, Amsterdamu, Kolonii i Frankfurtu nie przekroczy trzech godzin [8, 35]. Linia Rhône-Alpes (Lyon – Valence, LN4) długości 115 km spełnia wymogi prędkości 350 km/h. Linie *Mediterranéé* (Valence – Marseille/Nimes, LN5) długości 246 km wybudowano również w standardzie 350 km/h.



Rys. 6. Schemat sieci linii TGV we Francji oraz połączeń sieci z miastami sąsiednich krajów  
[[www.tgv.com/fr/index/plan-du-site](http://www.tgv.com/fr/index/plan-du-site)]

Ostatnią francuską inwestycją jest linia *Est Européen* (Paris Est – Metz/Nancy/Strasbourg, LN6) o długości 406 km. Stacja początkowa mieści się w Vaires-sur-Marne (22,7 km od dworca Paris-Est) i przebiega dolinami rzek Ourcq, Ardre, Aire, Mozy, Rupt de Mad i Mozeli. Stację końcową zlokalizowano w Vendenheim pod Strasburgiem. Na linii umieszczono trzy stacje pośrednie: Champagne-Ardenne TGV (w odległości ok. 5 km od centrum Reims), Meuse TGV (w pobliżu Verdun i Bar le Duc) oraz Lorraine TGV, 27 km od Metz i 37 km od Nancy. Wschodnia obwodnica Paryża (*Interconnection Ile de France*) stanowi połączenie linii LN3 i LN1. Pociągi TGV obsługują kierunki zbiegające się koncentrycznie w Paryżu. Najważniejsze dla ruchu wewnętrznego są połączenia z miastami: Lyon, Marsylia, Montpellier, Le Mans, Tours, Bordeaux, Nantes, Rennes, Brest, Lille (rys. 7). TGV zapewnia również międzynarodowe połączenia z Londynem, Brukselą, Amsterdamem, Kolonią, Lozanną, Genewą, Bernem i Mediolanem. Obecnie łączna długość linii TGV wynosi 1784 km.



Rys. 7. Jednostka TGV na nowym dworcu Roissy [www.300km-h.net]

Na liniach TGV jako minimalny przyjmuje się promień łuku równy 4000 m (w wyjątkowych przypadkach zmniejszony do 3200 m). Profil linii projektuje się, stosując pochylenia niwelety 25–35‰ [5]. Linie TGV są zelektryfikowane w systemie 25kV, 50 Hz. Należy podkreślić fakt, że podczas projektowania zwraca się szczególną uwagę na ochronę środowiska, stosując szereg środków ograniczających oddziaływania wibroakustyczne oraz na ochronę flory i fauny (jak np. budowa przejść dla zwierząt). Obecnie na sieci TGV eksploatuje się 440 pociągów, działa 180 stacji, a ruch jest prowadzony z prędkościami do 320 km/h.

### 2.2.3. Koleje włoskie

Linia dużych prędkości *Direttissima* jest linią dwutorową przeznaczoną do ruchu pasażerskiego z prędkościami do 250 km/h, o rozstawie torów 4,0 m, z nawierzchnią klasyczną (szyny UIC 60, podkłady betonowe). Została zelektryfikowana w systemie prądu stałego 3 kV. W układzie geometrycznym linii jako minimalne promienie łuków przyjęto 2500 m z maksymalną przechyłką 160 mm. Profil linii projektowano, przyjmując pochylenia miarodajne 15–20‰. Ze względu na niewystarczający rozstaw osi torów na linii obowiązuje maksymalna prędkość 250 km/h [27]. Jej przedłużeniem jest przebiegające w jednej piątej swej długości w tunelach połączenie z Neapolem.

Obecnie postępuje rozbudowa linii dużych prędkości. Uruchomiono linię o długości 130 km łączącą Mediolan z Turynem, przystosowaną do prędkości 300 km/h i powiązaną z lokalną siecią kolejową. Przyjęto system ETCS, poziomu 2. Jednostki napędowe są przystosowane do zasilania zarówno prądem stałym 3 kV, jak i przemiennym 25 kV, 50 Hz, ponieważ na sieci włoskich kolei dużych prędkości przewiduje się przejście na zasilanie prądem przemiennym.

W 2008 roku oddano do eksploatacji linię Mediolan – Bolonia (210 km), a w 2009 roku linię Bolonia – Florencja (79 km, z czego około 72 km w tunelach). Są to odcinki linii Turyn – Mediolan Florencja – Rzym – Neapol o długości 888 km (z czego 143 km w tunelach),

przeznaczonej do kursowania pociągów *Eurostar AV* z prędkościami 250–300 km/h. Czas jazdy z Turynu do Neapolu wynosi 5 godz., a z Mediolanu do Rzymu 2 godz. 45 min. W 15 punktach linia ma połączenie z lokalną siecią kolejową.

Postępują prace budowlane na nowych liniach łączących Mediolan z Wenecją i Mediolan z Genuą. Krótkie odcinki tych linii oddano już do eksploatacji. W planach jest reelektryfikacja linii Rzym – Florencja w celu przejścia na zasilanie prądem przemiennym.

Oprócz istniejących już dworców uczestniczących w obsłudze linii dużych prędkości, wybudowano również nowe dworce. Na stacji Turyn Porta Susa nowy układ torowy umieszczono pod dworcem istniejącym, w Bolonii wybudowano podziemny dworzec długości 650 m przeznaczony tylko dla pociągów obsługujących LDP. Nowy dworzec Florencja Belfiore umieszczono w siedmiokilometrowym tunelu przebiegającym pod miastem. Nowe stacje powstały także w Novarze, Reggio Emilia oraz Neapolu (Napoli Afragola). W południowo-zachodniej części Mediolanu przewidziano dworzec obsługujący tereny wystawowe. Nowym dworcem jest też Rzym Tiburtina.

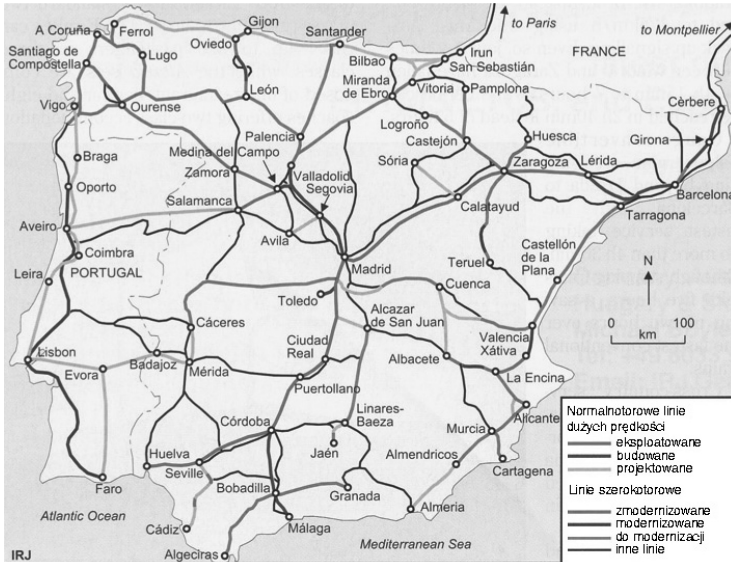
Docelowo układ LDP we Włoszech będzie miał kształt litery T utworzonej przez korytarz północ – południe na linii Szwajcaria – Mediolan – Florencja – Rzym – Neapol – Sycylia oraz korytarz wschód – zachód: Francja – Turyn – Mediolan – Wenecja – Triest – Słowenia. Inaczej niż we Francji, we Włoszech na liniach LDP są prowadzone również przewozy towarowe (głównie w nocy), co jest powodem ograniczenia pochyleń niwelety. Nowobudowane linie mają odpowiadać standardom europejskiej sieci linii dużych prędkości i zostaną objęte systemem ERTMS [3]. Zasadnicze parametry techniczne LDP we Włoszech są następujące:

- minimalny promień łuku poziomego 5450 m,
- największe pochylenie niwelety w terenie 18‰ (na dwóch odcinkach linii Rzym – Neapol do 21‰),
- największe pochylenie niwelety w tunelach 15‰,
- największa dopuszczalna prędkość jazdy 300 km/h,
- dopuszczalny nacisk osi 250 kN,
- prąd zasilania 25kV, 50 Hz,
- szerokość torowiska 13,6 m,
- rozstaw torów 5,0 m,
- przekrój poprzeczny tunelu 82 m<sup>2</sup>.

#### **2.2.4. Koleje hiszpańskie i portugalskie**

W Hiszpanii eksploatację pierwszej linii dużych prędkości Madryt – Sewilla (471 km) rozpoczęto w 1992 r. (rys. 8). Obecnie RENFE eksploatuje 1594 km linii dużych prędkości, a w budowie znajduje się dalsze 2219 km. W latach 1990–96 wybudowano 471 km nowej, dwutorowej linii łączącej Madryt z Sewillą, przystosowanej do ruchu pasażerskiego z prędkościami do 300 km/h. Przyjęto szerokość torów w standardzie europejskim. Minimalne promienie łuków wynoszą 3900 m, a największe dopuszczalne pochylenia niwelety toru 12,5‰. Na linii wybudowano 17 tuneli o łącznej długości 15,8 km oraz 17 wia-

duktów (9,8 km). Zastosowano nawierzchnię klasyczną z szynami UIC 60 i podkładami betonowymi. Linię zelektryfikowano w systemie 25 kV, 50 Hz. Wybudowano 5 nowych stacji (Madrid Puerta de Atocha, gdzie mieści się centrala sterowania ruchem, Ciudad Real, Puerollano, Córdoba i Sevilla Santa Justa) [22].



Rys. 8. Linie dużych prędkości oraz stary układ linii szerokotorowych w Hiszpanii i Portugalii [International Railway Journal, 2004/10]

W 2003 roku otwarto linię Madryt – Saragossa – Lérida o długości 550 km, z odgałęzieniem do Huesca. W 2008 r. uruchomiono ostatni odcinek linii Madryt – Barcelona łączący stację Camp de Tarragona ze stacją Barcelona Sants (86 km). Uzyskano połączenie Malagi przez Kordowę, Madryt i Saragossę z Barceloną. Linia Madryt – Barcelona długości 796 km została zaprojektowana dla prędkości 350 km/h. Rozstaw torów zwiększono do 4,50 m, minimalny promień łuków do 7250 m, przewidziano również większe pochylenia niwelety (do 25‰). Na linii istnieje 75 wiaduktów o łącznej długości 26,6 km oraz 23 tunele (24,4 km).

Koleje portugalskie przewidują budowę od 2013 r. około tysiąca kilometrów linii dużych prędkości łączących Lizbonę z Porto i Valençą oraz Elvas, a w drugim etapie połączenie Aveiro z Almada. Nowe linie będą stanowić integralną część europejskiej sieci kolejowej. Na linii łączącej Lizbonę z Madrytem przewiduje się w przyszłości prędkość 350 km/h, a na pozostałych liniach od 250 do 300 km/h.

### 2.2.5. Koleje niemieckie

Początkowo projekt niemieckiej sieci LDP obejmował jedynie trzy połączenia: Hamburg – Würzburg – Monachium, Hamburg – Frankfurt – Bazylea oraz Hanower – Frankfurt

– Stuttgart – Monachium (rys. 9). Pierwszy odcinek linii dużych prędkości pomiędzy Fuldą i Würzburgiem uruchomiono w 1988 r. Był to fragment linii Hanower – Würzburg, którą w całości oddano do eksploatacji w 1992 r. [30].



Rys. 9. Rozmieszczenie linii dużych prędkości na sieci DB: 1) linie eksploatowane, 2) linie modernizowane [Kongres „Rail Speed”, Paryż 2005]

Rozpoczętą w 1995 r. budowę nowej linii Kolonia – Frankfurt z łącznicą do Wiesbaden oraz lotniska obsługującego Kolonię i Bonn, uznano za jedną z ważniejszych inwestycji europejskiej sieci linii dużych prędkości. Nowe połączenie jest krótsze o 45 km od wcześniej istniejącego, a czas przejazdu z Kolonii do Frankfurtu wynosi tylko 59 min. (poprzednio 2 godziny 13 minut). Przy projektowaniu linii, dostosowanej do prędkości 300 km/h, przyjęto minimalne promienie łuków 3350 m, a dopuszczalne pochylenie profilu zwiększono do 40‰ [46]. Linia ta, przeznaczona wyłącznie dla ruchu pasażerskiego, przebiega w pobliżu autostrady A3. Ma ona nie tylko istotne znaczenie dla przewozów krajowych, lecz także stanowi fragment sieci transeuropejskiej (TEN) na kierunku północ – południe (Holandia – Szwajcaria – Włochy). Na trasie wykonano 30 tuneli o łącznej długości 47 km oraz 6 km mostów. Na 155 km linii została ułożona nawierzchnia niekonwencjonalna (bezpodsypkowa) dwóch konstrukcji: *Rheda* i *Züblin*, na warstwie nośnej stabilizowanej hydraulicznie oraz na warstwie betonu (w korycie betonowym).

Budowę nowej linii powiązano z przebudową dworców we Frankfurcie, Moguncji, Wiesbaden i Kolonii, które zostały dostosowane do obsługi pociągów ICE, oraz budową nowych dworców w Montabaur, Limburgu oraz w portach lotniczych Kolonii i Frankfurtu. Te dwa ostatnie są umieszczone pod terminalami lotniczymi i stanowią punkt bezpośredniej przesiadki z samolotów do pociągów dalekobieżnych.

### 2.2.6. Koleje holenderskie

W Holandii linia dużych prędkości (*HSL-Zuid/Hogesnelheidslijn-Zuid*) zbudowana przez państwo jest częścią połączenia Amsterdam – Bruksela – Paryż, przewidzianego w planach europejskiej sieci dużych prędkości [22]. Przebiega od Amsterdamu przez lotnisko Schiphol do Rotterdamu i dalej do belgijskiej granicy z połączeniem w kierunku Bredy. Umożliwia to połączenie Amsterdamu z Londynem, Paryżem, Brukselą i Antwerpią liniami należącymi do europejskiej sieci dużych prędkości. W przeważającej części linia jest prowadzona poniżej poziomu morza, dlatego w ok. 85% tory posadowiono na obiektach inżynieryjnych (tunele, mosty oraz nawierzchnia niekonwencjonalna Rheda 2000), a tylko w około 15% na podtorzu ziemnym. Trasa długości 412 km przebiega w 46% w tunelach, a w 26% na wiaduktach. Zastosowano pochylenia niwelety od 15 do 25‰ i minimalne promienie łuków 7000 m przy rozstawie torów 5,00 m. Linia jest zelektryfikowana w systemie 25 kV, 50 Hz.

### 2.2.7. Koleje chińskie, tajwańskie i koreańskie

Na kontynencie azjatyckim największy rozwój kolei dużych prędkości obserwuje się w Chinach<sup>3</sup>. W 2007 roku na Tajwanie otwarto, po siedmiu latach budowy, linię dużych prędkości o długości 345 km, łączącą wzdłuż zachodniego wybrzeża stolicę Taipei z miastem Kaohsiung. W rejonie położonym wzdłuż nowej linii mieszka 75% ludności Tajwanu. Japońskie pociągi serii 700, o maksymalnej prędkości 300 km/h, przewożą w ciągu doby 187 000 pasażerów (maksymalna zdolność przewozowa to 300 000 pasażerów / dobę). Na trasie znajdują się liczne obiekty inżynieryjne: tunele o łącznej długości 62 km, mosty i wiadukty o długości 252 km. Na szlakach zastosowano niekonwencjonalną nawierzchnię na płycie nośnej typu japońskiego, na stacjach niekonwencjonalną nawierzchnię typu *Rheda*.

W Korei Południowej linia dużych prędkości *Korea Trans eXpress* (KTX) o długości 412 km łączy stolicę kraju Seul z miastem Pusan na południowo-wschodnim wybrzeżu. Ponieważ linia przebiega w terenie górskim, konieczne było wybudowanie 75 tuneli o łącznej długości 190 km oraz 70 mostów i wiaduktów o długości 120 km. Na linii kursuje francuski tabor TGV, przy czym 12 pierwszych składów sprowadzono z Francji, a następne 34 składy zbudowano w Korei. Prędkość maksymalna wynosi 300 km/h, czas jazdy pomiędzy stacjami końcowymi około 2 godzin. W ciągu doby pociągi przewożą około 330 000 pasażerów.

<sup>3</sup> Opis chińskich kolei dużych prędkości zawiera artykuł A. Massela [od Redakcji].

## 3. WYMAGANIA DOTYCZĄCE PROJEKTOWANIA I EKSPLOATACJI LINII DUŻYCH PRĘDKOŚCI

### 3.1. Kompatybilność i interoperacyjność techniczna składników LDP

Kompatybilność systemu linii dużych prędkości oznacza możliwość harmonijnego współdziałania ze starszymi, już eksploatowanymi systemami kolejowymi. Przez interoperacyjność rozumie się zapewnienie bezpiecznego i niezakłóconego funkcjonowania transeuropejskiemu systemowi kolejowemu. Składnikami interoperacyjności są te elementy, dla których zdefiniowano technologię, konstrukcję, materiały oraz procesy produkcji i oceny, niezależnie od podsystemu, do którego się odnoszą. Konieczna jest pełna kompatybilność pomiędzy taborem i infrastrukturą, co oznacza, że elementy infrastruktury muszą być kompatybilne ze sobą wzajemnie oraz z eksploatowanymi pociągami dużych prędkości. Wymagało to opracowania specyfikacji technicznych interoperacyjności (*Technical Specifications for Interoperability*, TSI) opisujących podstawowe warunki techniczne i eksploatacyjne w sposób zgodny z normami europejskimi, ogólnymi zasadami technicznej jednności w kolejnictwie i postanowieniami systemu wzajemnego użytkowania wagonów towarowych (RIV) oraz wagonów osobowych i bagażowych (RIC) w komunikacji międzynarodowej.

Opracowana dla transportu kolejowego, w tym dla systemu linii dużych prędkości, tzw. piramida legislacyjna obejmuje [32]:

- dyrektywy dotyczące interoperacyjności [10, 16, 18],
- techniczne specyfikacje interoperacyjności (TSI) [14, 15],
- dokumenty szczegółowe (normy wskazane w dokumentach TSI, jako obowiązujące lub normy zharmonizowane, nieobligatoryjne, standardy techniczne itd.).

W wypadku nawierzchni i budowli inżynierskich związanych z torem trudność ujednoczenia wymagań technicznych wynika nie tylko z istniejących różnic w standardach konstrukcyjnych (szerokości toru, skrajni i układu geometrycznego toru), lecz również z przyjętych koncepcji eksploatacji linii. Problem polega więc na odpowiednim dostosowaniu standardów konstrukcyjnych nawierzchni, modernizacji mostów oraz wyborze dopuszczalnych podłużnych pochyleń torów. Z punktu widzenia infrastruktury drogi kolejowej istotne są takie czynniki, jak: skrajnia kinematyczna, dynamiczne zachowanie się taboru, w tym współpraca koła z szyną, wielkości sił dynamicznych wywieranych na konstrukcję nawierzchni i podtorze (graniczne wartości sił działających na tor), wpływ zjawisk aerodynamicznych na otoczenie (zmiany ciśnienia, hałas aerodynamiczny, wywiewanie podsypki, poziom drgań gruntu w sąsiedztwie obiektów infrastruktury itp.).

### 3.2. Oddziaływanie pojazdów na konstrukcję nawierzchni i środowisko

Wielkość i charakter oddziaływań między pojazdami oraz nawierzchnią i podtorzem zależą od konstrukcji pojazdów, prędkości jazdy, która w przypadku linii dużych prędk-

kości mieści się w granicach 200–320 km/h, a także od cech nawierzchni i podtorza oraz stanu utrzymania zarówno pojazdów, jak i nawierzchni.

Specyfikacje TSI, 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 jest przeznaczony do jazdy z prędkościami 190–250 km/h i może obejmować zespoły trakcyjne lub pociągi o zmiennym składzie. Podane liczby dotyczą maksymalnej prędkości eksploatacyjnej, a więc prędkości, z jaką pociągi mają kursować na danym odcinku podczas zwykłej eksploatacji. Tabor musi ponadto wykazywać odpowiednią skuteczność hamowania, również na pochyleniach. Na przykład droga przebyta do zatrzymania w wypadku hamowania awaryjnego od prędkości 350 km/h nie powinna przekraczać 5360 m, a od 300 km/h – 3650 m. Ze względu na siły podłużne przekazywane przy hamowaniu lub rozruchu, maksymalne przyspieszenie lub opóźnienie nie może przekroczyć  $2,5 \text{ m/s}^2$ . Specyfikacje określają również parametry skrajni kinematycznej, maksymalną długość pociągu i jego masę (całkowita masa nie może przekroczyć 1000 t). Wielkość oddziaływań dynamicznych taboru zależy od stosunku masy usprężynowanej do masy nieusprężynowanej pojazdu oraz nacisków osi, a dynamika jego ruchu od:

- maksymalnej prędkości,
- maksymalnego niedomiaru przechyłki podczas jazdy po łuku,
- profilu koła i szyny oraz szerokości toru,
- masy i bezwładności nadwozia wagonu, wózków oraz zestawów kołowych,
- charakterystyki zawieszonych pojazdów,
- nierówności geometrycznych toru.

Wskutek owalizacji kół oraz uszkodzeń ich powierzchni toczonej, pionowe dynamiczne oddziaływania kół pociągów dużych prędkości mogą ulegać zwiększeniu. Głównym czynnikiem decydującym o wielkości tych oddziaływań jest jednak sztywność podłoża szyny [22]. Doświadczenia wyniesione z eksploatacji LDP wykazały konieczność ograniczenia wielkości nacisków pionowych pojazdów w zależności od prędkości jazdy. Dopuszczalne wartości nacisku osi pojazdu przyjmuje się obecnie jako 170 kN dla prędkości powyżej 250 km/h i 180 kN dla prędkości do 250 km/h [15]. Wartości sił dynamicznych przekazywanych przez koła pojazdu na szynę nie mogą przekroczyć 180 kN przy prędkościach 200–250 km/h, 170 kN przy 250–300 km/h i 160 kN przy większych prędkościach. Dalsze zmniejszanie nacisków, na przykład do 85 kN, co zastosowano w pociągach japońskich serii 300X, może przy prędkościach rzędu 320–350 km/h prowadzić do zbyt dużego odciążenia pojazdu wskutek wystąpienia zjawisk aerodynamicznych [39]. Ograniczając naciski osi, należy więc uwzględniać stateczność aerodynamiczną pojazdów. W szczególnych warunkach, na przykład tam, gdzie tor linii dużych prędkości ułożony jest na obiektach inżynierskich o znacznej wysokości, nagłe boczne uderzenie wiatru może stwarzać zagrożenie dla bezpieczeństwa pociągu [24].

Podczas przemieszczania się pojazdu szynowego, wskutek poprzecznych i obrotowych ruchów zakłócających, występuje zjawisko wężykowania zestawu kołowego. Teoretycznie



przyjmuje się, że wężykowanie kinematyczne ma postać sinusoidalnego ruchu okresowego o długości fali

$$L_w = 2\pi \sqrt{\frac{r \times s}{2\gamma}},$$

gdzie:

$r$  – promień koła [m],

$s$  – odległość między osiami szyn (równa 1,5 m),

$\gamma$  – kąt nachylenia obręczy koła, czyli stożkowatość obręczy (1:20).

Częstotliwość przemieszczeń zestawu wynosi

$$f = \frac{V}{L_w} [\text{s}^{-1}].$$

Długość fali wężykowania obliczona dla prędkości jazdy 300 km/h przy średnicy kół 920 mm wyniesie ok. 16,5 m, a częstotliwość przemieszczeń ok. 5 Hz.

Przy analizie układu sił działających na zestaw kołowy w punkcie styku koła z szyną [13] rozróżnia się składową statyczną siły prowadzącej, składową quasi-statyczną pochodzącą od niedoboru lub nadmiaru sił odśrodkowych działających w czasie przejazdu po łuku oraz składową dynamiczną wywołaną wężykowaniem zestawu kołowego lub uderzeniami spowodowanymi przez miejscowe nierówności. Główną przyczyną oddziaływań na zestaw kołowy są zmienne siły styczne występujące między kołem a szyną. Zestaw kołowy porusza się niestatecznie, jeśli okresowe przemieszczenia poprzeczne zestawu kołowego wyczerpują luz pomiędzy obręczą koła a krawędzią szyny. Warunki współpracy koła z szyną charakteryzuje ekwiwalentna stożkowatość, której wartość – oprócz geometrii szyny i koła – zależy również od nierówności poziomych toru, zwłaszcza zmiany szerokości toru. W przypadku małej wartości kąta nachylenia obręczy w stosunku do szyny przesunięcie punktu styku koła z szyną jest niewielkie, a przy wklęsłym zużyciu obręczy praktycznie nie występuje. Ekwiwalentną stożkowatość definiuje się następująco:

$$\gamma_e = \frac{1}{\Delta y} \cdot \frac{\Delta r_1 - \Delta r_2}{2},$$

gdzie:

$\Delta y$  – amplituda poprzecznego przemieszczania się zestawu kołowego po powierzchni szyn,

$\Delta r_1$  i  $\Delta r_2$  – chwilowe zmiany promieni okręgów toczyń szyn.

W TSI graniczne wartości ekwiwalentnej stożkowatości uzależniona się od amplitudy poprzecznego przemieszczenia zestawu kołowego po powierzchni szyn. Przyjmuje się amplitudę:

$\Delta y = 3 \text{ mm}$ , jeśli  $S - S_R \geq 7 \text{ mm}$ ,

$\Delta y = [(S - S_R) - 1]/2$ , jeśli  $5 \text{ mm} \leq S - S_R < 7 \text{ mm}$

$\Delta y = 2 \text{ mm}$ , jeżeli  $S - S_R < 5 \text{ mm}$ .

W tych wyrażeniach  $S$  oznacza szerokość toru [mm], a  $S_R$  – odległość między obrzeżami kół zestawu (1420÷1426 mm) [14].

Według karty UIC 518 [44] ekwiwalentna stożkowatość powinna utrzymywać się w granicach 0,05÷0,5, a dopuszczalne wartości, zależnie od prędkości jazdy, wynoszą: 0,3 dla prędkości do 200 km/h, 0,2 dla prędkości z zakresu 200–280 km/h oraz 0,1 dla prędkości powyżej 280 km/h. W TSI dla prędkości 160–280 km/h przyjęto graniczną wartość ekwiwalentnej stożkowatości 0,2, a dla większych prędkości 0,1. Uzyskanie odpowiedniej ekwiwalentnej stożkowatości jest szczególnie istotne przy dużych prędkościach jazdy pociągów pasażerskich oraz przy przejazdach próżnych wagonów towarowych z prędkościami 100÷120 km/h. Wymagane  $\gamma_e$  można osiągnąć, ograniczając odległość między obrzeżami zestawu kołowego do wymiaru 1421 mm, zwiększając dla nowobudowanej linii nominalną szerokość toru do 1436 mm oraz modyfikując profil główki szyny. Bardziej płaski kształt główki szyny sprzyja zmniejszeniu ekwiwalentnej stożkowatości poniżej wartości 0,1, natomiast zwiększenie zaokrąglenia główki powoduje przekroczenie wartości 0,4 i pojawienie się niestabilnego ruchu pojazdu. Zjawiska dynamiczne będące wynikiem współdziałania pojazdu z nawierzchnią oceniane są pod względem:

- wpływu na bezpieczeństwo jazdy (ryzyko wejścia obrzeża koła na szynę, tzw. **kryterium wykolejenia**),
- oddziaływania na konstrukcję nawierzchni (możliwość trwałego odkształcenia poprzecznego całej ramy toru podczas przejazdu pociągu (tzw. **kryterium torowe**),
- wpływu na spokojność jazdy.

Kryterium wykolejenia to stosunek siły prowadzącej  $Y$  do siły pionowej  $Q$ . Jego graniczna wartość jest nazywana współczynnikiem bezpieczeństwa przeciwko wykolejeniu:

$$\lim \frac{Y}{Q} < 0,8 .$$

Dla kąta pochylecia obrzeża koła równego 70 stopni przyjmuje się wartość tego ilorazu równą 1,2. Dopuszczalne oddziaływanie na konstrukcję nawierzchni zależy od odporności konstrukcji na trwałe poprzeczne odkształcenie toru (przesunięcie ramy toru w podsypce) wyrażone graniczną wartością sumy sił prowadzących działających na tor. Jest to tzw. kryterium Prud'homme'a [14]:

$$\lim \sum Y_{(2m)} \leq K \left( 10 + \frac{P}{3} \right) [\text{kN}],$$

gdzie:  $Y_{(2m)}$  – średnia wartość siły  $Y$  dla odcinka długości 2 m.

Wzór ten określono na podstawie empirycznej. Przy jego określaniu uwzględniono rozstaw osi zestawów kołowych, konstrukcję wózka oraz prędkości jazdy. Graniczna wartość sumy sił prowadzących jest więc funkcją maksymalnego statycznego nacisku osi  $P$ , a w praktyce również prędkości jazdy oraz stanu nawierzchni. Wartość współczynnika  $K$  zależy od konstrukcji nawierzchni i stanu jej utrzymania.

Ze względu na szkodliwe oddziaływanie na otoczenie, przejazd pociągu nie może spowodować wzrostu prędkości powietrza na poboczu, mierzonej na wysokości 1,2 m i w odległości 3,0 m od osi toru, o wartość większą niż 15,5 m/s przy prędkości do 189 km/h, 20 m/s przy prędkości 190–249 km/h i 22 m/s przy wyższych prędkościach. Maksymalne zmiany ciśnienia na wysokości od 1,5 m do 3,3 m ponad poziomem główki szyny nie mogą przekroczyć 795 Pa. Wpływ bocznego wiatru ocenia się dla najbardziej wrażliwego na jego oddziaływanie pojazdu w składzie pociągu. Uznaje się, że pociąg jest odporny na działanie bocznego wiatru, jeśli sporządzone dla niego tzw. krzywe wiatrowe co najmniej odpowiadają referencyjnym krzywym wiatrowym. Na przykład przy prędkości jazdy równej 320 km/h po torze prostym i działaniu wiatru pod kątem prostym w stosunku do pociągu jego referencyjna prędkość w płaskim terenie wynosi 30,8 m/s. Określa się również zmiany ciśnienia podczas przejazdu pociągu tunelem o określonym przekroju poprzecznym. Na przykład przy prędkości pociągu  $\geq 250$  km/h i przekroju poprzecznym tunelu 63 m<sup>2</sup>, zmiana ciśnienia nie może przekroczyć 1600 Pa.

Hałas aerodynamiczny zaczyna dominować przy prędkościach przekraczających 220–250 km/h. Zależność poziomu ciśnienia akustycznego  $L_A$  od prędkości jazdy większych niż 200 km/h określana jest następująco:

$$L_A = L_{A,200} + \alpha_A \cdot 10 \log (V/200) \text{ [dB(A)]},$$

gdzie:

- $L_{A,200}$  – poziom ciśnienia akustycznego przy prędkości 200 km/h,
- $\alpha_A$  – współczynnik zależny od źródła hałasu (np. dla hałasu aerodynamicznego wynosi 6÷7, dla hałasu toczenia 3, dla emisji akustycznej pantograf – sieć 4,9).

Poziomy  $L_A$  obliczane dla różnych źródeł hałasu muszą być zsumowane. Głównymi źródłami hałasu aerodynamicznego są współpraca pantografu z siecią (iskwienie, poślizgi pantografu) oraz pokonywanie oporów powietrza przez elementy pojazdu, zwłaszcza wózki, konstrukcję pantografu, połączenia między wagonami. Badania wykazały, że w otoczeniu linii TGV, na której ruch odbywa się z prędkościami do 300 km/h, przy natężeniu ruchu od 65 do 140 pociągów na dobę poziom hałasu sięga 70–80 dB(A) przy wyraźnie odczuwalnych drganiach wywołanych przejazdem pociągu.

Ruch pociągów jest źródłem oddziaływań wibroakustycznych. Wzbudzone przy przejeździe pociągu drgania mechaniczne (spowodowane zwłaszcza siłami dynamicznymi na styku koła z szyną) są przekazywane podtorzu i podłożu gruntowemu, a w dalszej kolejności obiektom inżynierskim i budynkom znajdującym się w sąsiedztwie toru. Drgania przenoszone są przez grunt głównie w postaci fal powierzchniowych Rayleigha. Prędkość ich rozchodzenia się jest zmienna w zakresie 50–250 m/s, a długość fali w zakresie 5–50 m. Zasięg drgań szkodliwych lub uciążliwych dla ludzi może wynosić 100 m i więcej. Częstotliwość drgań emitowanych leży najczęściej w zakresie 10–60 Hz, natomiast drgania mechaniczne wzbudzone w konstrukcjach mają zazwyczaj częstotliwość 50–125 Hz. Toczenie się koła po szynie stanowi główne źródło hałasu przy prędkościach z zakresu 80–220 km/h. Największe natężenie hałasu emitowanego przez układ koło

– szyna występuje w linii prostopadłej do osi toru. Hałas ten może osiągać 90 dB(A) w paśmie częstotliwości 300–1000 Hz. Drugie ekstremum przypada na częstotliwość ok. 2000 Hz, minimum natomiast na pasmo 100–125 Hz.

Zmienność obciążeń w strefie styku koła z szyną, wynikająca z zakłóceń podstawowego ruchu pojazdu i wzbudzenia wysokoczęstotliwościowych drgań koła i szyny, prowadzi do zużycia falistego zarówno szyn, jak i obręczy kół, czego konsekwencją jest zwiększona emisja akustyczna. Dodatkowym źródłem tej emisji może być różnica promieni tocznych, występująca na obwodzie koła (poligonizacja kół). Zjawisko to występuje szczególnie często w zestawach kołowych pociągów dużych prędkości. Nierówności powierzchni tocznej koła i szyny, okresowo występujący styk obrzeża koła z szyną oraz poślizgi kół powodują hałas odbierany w postaci szumu i stuków. Może on być szczególnie dokuczliwy w przypadku zużycia falistego szyn (tzw. śpiewające szyny) oraz płaskich starć obręczy kół.

Podczas budowy lub modernizacji linii dużych prędkości ocena oddziaływania na środowisko wymaga znajomości lokalnej populacji – jej struktury i dynamiki rozwoju, migracji, charakteru osadnictwa, warunków zdrowotnych, oraz środowiska przyrodniczego – fauny i flory, istniejących ekosystemów, walorów krajobrazowych oraz lokalizacji i typu rezerwatów przyrody. Linia kolejowa jest obiektem liniowym, przecinającym różnorodne struktury środowiskowe. W fazie budowy lub modernizacji linii mogą wskutek budowy nasypów, przekopów i dróg dojazdowych lub wykorzystywania miejscowych zasobów naturalnych (kopaliny, wody) wystąpić zakłócenia zlewni wód powierzchniowych i podziemnych. Może również nastąpić rozdzielenie ekosystemów powodujące zmiany w ich funkcjonowaniu. Droga kolejowa i związane z nią dodatkowe urządzenia – ogrodzenia, linie energetyczne, nasypy i przekopy – stanowią przeszkodę w przemieszczaniu się zwierząt. Dla ich ochrony niezbędna jest budowa przeszkód uniemożliwiających dostęp do torów: dla małych zwierząt – płotów lub rowów, dla dużych – ścian, a także przejść nad lub pod drogą kolejową, przejść szerokich (tzw. mostów biologicznych) oraz przejść dla płazów.

### **3.3. Klasyczne konstrukcje nawierzchni linii dużych prędkości**

Klasyczna nawierzchnia kolejowa jest konstrukcją złożoną z szyn, podkładów, złączy i podsypki (niekiedy również z warstwy filtracyjnej i ochronnej). Konstrukcja ta nie uległa od długiego czasu poważniejszym zmianom, a współczesne pojazdy szynowe mogą poruszać się po niej z coraz większymi prędkościami. Warto przypomnieć, że jeszcze w latach sześćdziesiątych XX wieku specjaliści zajmujący się dynamiką toru kolejowego określali wartość prędkości krytycznej pojazdu na ok. 420 km/h [7]. Postęp w rozwoju klasycznej nawierzchni kolejowej wyraża się więc jedynie w ciągłym doskonaleniu jej elementów: szyn, podkładów i przytwierdzeń, zwiększającym eksploatacyjną niezawodność nawierzchni.

Nawierzchnię i podtorze charakteryzuje się, określając sprężystość konstrukcji wyznaczaną na podstawie pomiaru odkształceń toru pod obciążeniem, tłumienie konstrukcyjne oraz charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe stanowiące dynamiczną odpowiedź konstrukcji na oddziaływanie pojazdów. Prócz odpowiedniej sztywności pionowej nawierzchni, określanej zazwyczaj jako 150 MN/m (przykładem może być nowa linia RENFE Kordowa – Malaga, mająca nawierzchnię z szynami 60E2 i monoblokowymi podkładami betonowymi), powinny być również zachowane wystarczające opory boczne toru, spełniające kryterium torowe. Dynamiczne zachowanie nawierzchni można charakteryzować za pomocą współczynników zanikania poziomych i pionowych drgań konstrukcji. Wyrażają one wielkość tłumienia drgań jako funkcję odległości wzdłuż toru. Impedancje toru określa się, badając impuls siły przykładowej do główki szyny jako odpowiedź częstotliwościową w funkcji siły lub przyspieszenia, mierzoną w kierunku pionowym i poziomym.

Nawierzchnie klasyczne, eksploatowane obecnie w wielu zarządach kolejowych na liniach dużych prędkości, oraz sposób ich utrzymania są stopniowo dostosowywane do zmieniających się warunków eksploatacji z wykorzystaniem wyników wieloletnich badań i obserwacji oraz posiadanej wiedzy praktycznej. Podstawowym kryterium optymalizacji tych działań jest zazwyczaj bezpieczeństwo jazdy i minimalizacja kosztów utrzymania infrastruktury kolejowej.

Problem właściwego doboru poszczególnych części składowych nawierzchni sprowadza się do odpowiedniego dopasowania cech wytrzymałościowych oraz charakterystyk dynamicznych całej konstrukcji. Wybierając typ **szyny**, rozpatruje się ją, po pierwsze, jako element nośny konstrukcji, oceniając wytrzymałość i cechy techniczne (odporność na pękanie i złamanie, jak również spawalność / zgrzewalność), po drugie, jako element przejmujący bezpośrednio oddziaływanie kół pojazdów. W tym przypadku istotnymi cechami są odporność na zużycie i odkształcenia oraz wytrzymałość zmęczeniowa w warunkach dynamicznych obciążeń o zmiennych częstotliwościach. Duże przyspieszenia drgań szyn powodują zwiększenie przyspieszeń łożysk osiowych pojazdów i w konsekwencji zauważalny wzrost nacisków dynamicznych, zwłaszcza w przypadku nawierzchni niekonwencjonalnych.

Szyna o profilu 60E1 jest standardowym typem szyny układanym na europejskich liniach dużych prędkości oraz liniach o dużym natężeniu przewozów. Wynika to z obserwacji wskazujących, że przy niewielkich naciskach (rzędu 160 kN), lecz przy prędkościach jazdy przekraczających 160 km/h opłacalne jest układanie szyn o masie co najmniej 60 kg/m. Przy prędkościach 300–350 km/h zaleca się stosowanie szyn 60E2 z poprzecznym nachyleniem 1:20 i zachowaniem możliwie niewielkich wartości ekwiwalentnej stożkowatości. W Niemczech przyjmuje się standardowo szyny 60E2, gdyż uważa się, że szyna o tym profilu jest bardziej odporna na uszkodzenia zmęczeniowe i kontaktowe. Dopuszcza się jednak także inne typy szyn [13].

**Przytwierdzenia**, które utrzymują stałą szerokość toru i poprzeczne nachylenie szyn, w przypadku podkładów betonowych zapewniają także izolację elektryczną szyny od

podkładu. Stanowią również element tłumiący drgania wywołane oddziaływaniem kół pojazdów. Znaczne zróżnicowanie typów przytwierdzeń wynika z odmiennych doświadczeń poszczególnych kolei, przyjmujących różne założenia przy opracowywaniu ich koncepcji. Według jednego z nich dopuszczalne jest pionowe przemieszczanie się szyny tylko wraz z przytwierdzonym do niej podkładem. Zgodnie z drugim założeniem możliwy jest ruch pionowy szyny względem podkładu (rzędu 1 mm) z zachowaniem dobrego prowadzenia zestawu kołowego. Na liniach dużych prędkości z klasyczną nawierzchnią stosuje się w zasadzie łatwiejsze w utrzymaniu przytwierdzenia sprężyste lub przytwierdzenia typu mieszanego, łączące cechy przytwierdzeń pośrednich i sprężystych.

Własności użytkowe przytwierdzeń określają najczęściej następujące parametry [33]:

- opór przeciwko podłużnym przemieszczeniom szyny,
- opór przeciwko skręcaniu,
- siła docisku stopki szyny,
- rezystancja w systemie przytwierdzenie – podkład (nie mniejsza niż 5 kΩ).

Dynamiczna sztywność przytwierdzeń w torze klasycznym nie powinna być większa niż 600 MN/m (w rozwiązaniach niekonwencjonalnych jest ona ograniczana do 150 MN/m) [11]. Również oddziaływania kół w poziomej płaszczyźnie toru maleją wraz z mniejszą sztywnością przytwierdzeń.

Przy wyborze cech przytwierdzeń sprężystych, istotne znaczenie mają właściwości materiałowe przekładek i wkładek izolacyjnych, wchodzących w skład przytwierdzenia. Tworzywo przekładek powinno zapewniać odpowiedni współczynnik tarcia (istotny ze względu na opór podłużny), sprężystość i wystarczającą trwałość. Zadane tłumienie drgań wypełniają przekładki ograniczające drgania wyższych częstotliwości. Wykonywane są obecnie z poliuretanu, tworzyw piankowych lub korka stabilizowanego kauczukiem i mają najczęściej przynajmniej jedną powierzchnię przestrzennie ukształtowaną.

Grube przekładki powinny być stosowane w przytwierdzeniach o dwóch stopniach sprężynowania, tam gdzie jest wymagana szczególnie dobra wibroizolacja. Według [33], przekładki pod względem sprężystości dzielą się na:

- miękkie: o sztywności dynamicznej mniejszej od 100 MN/m,
- średnie: o sztywności dynamicznej 100–200 MN/m,
- twarde: o sztywności dynamicznej większej od 200 MN/m.

Przekładki mogą mieć niskie tłumienie (mniejsze od 15%), średnie (15–30%) i wysokie (ponad 30%).

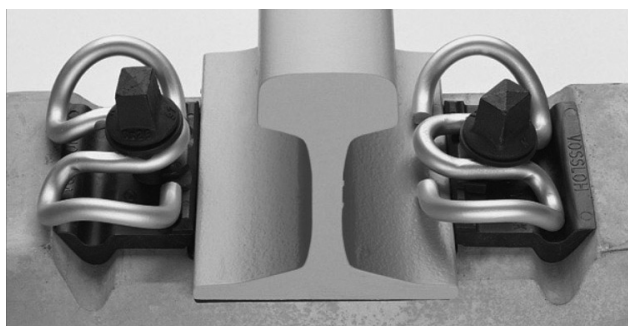
Przytwierdzenie sprężyste typu SB (rys. 10), eksploatowane przez polskie koleje, zapewnia opór podłużny równy 17,5 kN, siłę docisku stopki szyny 24,6 kN, opór na skręcanie 1,49 kNm (dla obrotu szyny o 1°) i wysokie tłumienie obciążeń dynamicznych, równe 57,45% [10]. W wielu zarządach kolejowych są eksploatowane przytwierdzenia sprężyste *Pandrol Fast Clip* (rys. 11) oraz przytwierdzenia W14 i W21 firmy Vossloh (rys. 12). Koleje francuskie stosują na liniach dużych prędkości przytwierdzenia RS i *Nabla* (rys. 13).



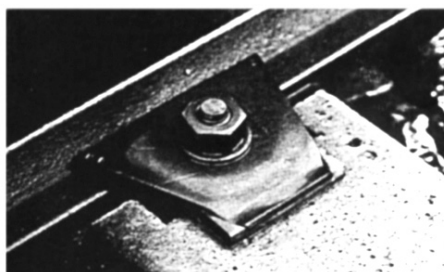
Rys. 10. Przymocowanie sprężyste typu SB-4 [[www.vossloh-fastening-systems.de](http://www.vossloh-fastening-systems.de)]



Rys. 11. Przymocowanie sprężyste *Pandrol FastClip* stosowane w nawierzchniach linii dużych prędkości [[www.pandrol.com/html/products/fc.htm](http://www.pandrol.com/html/products/fc.htm)]



Rys. 12. Przymocowanie W14 firmy Vossloh [[www.vossloh-fastening-systems.de](http://www.vossloh-fastening-systems.de)]



Rys. 13. Przymocowanie „Nabla” eksploatowane na linach TGV we Francji [42]

Opory, jakie przytwierdzenia stawiają przy pionowych przemieszczeniach, w znacznym stopniu zależą od właściwości przekładek podszynowych oraz modułu sprężystości pionowej toru. Należy podkreślić, że pod obciążeniem pionowym opór podłużny przytwierdzenia zmienia się liniowo [11].

**Podkłady betonowe** mają następujące charakterystyki techniczne: masa 224÷320 kg, długość 2,30÷2,60 m, wysokość w przekroju pod szyną 0,180÷0,235 m, wysokość w środku 0,125÷0,180 m, powierzchnia oparcia 0,4462÷0,6805 m<sup>2</sup>. Rozstaw podkładów, wynoszący zazwyczaj 600 mm, może być w pewnych warunkach powodem powstawania w wyniku rezonansu zjawiska fali stojącej – gdy długość fali ugięcia szyny będzie równa podwójnemu rozstawowi podkładów.

Odmianą podkładu betonowego, który nie jest stosowany w Polsce, lecz szeroko eksploatowany przez inne koleje (między innymi na liniach TGV we Francji), jest podkład dwublokowy, wykonywany w postaci dwóch bloków połączonych stalowym łącznikiem lub rurą z tworzywa wypełnioną betonem. Podkłady tego typu nie są podatne na oddziaływanie dużych momentów zginających wywołanych nierównomiernymi odkształceniami warstwy podsypki pod podkładem. Podkłady dwublokowe wykonuje się również z polimerobetonu. Charakteryzuje je większa sprężystość i zdolność tłumienia drgań. W celu zwiększenia sprężystości nawierzchni i uzyskania korzystniejszego rozkładu nacisków, a tym samym spowolnienia procesu zużycia podsypki oraz rozwoju zużycia falistego, eksploatuje się również podkłady betonowe z przyklejonymi do ich dolnych powierzchni podkładkami USP (*Under Sleeper Pads*) z polimerów, o grubości 15–30 mm i sztywności około 35 kN/mm. Stosowanie podatnych USP nie wpływa na wielkość oddziaływań między kołem i szyną, ale może prowadzić do zmniejszenia naprężeń w podsypce [1].

Na liniach dużych prędkości są spotykane również podkłady z drewna twardego (dąb, buk) lub miękkiego (sosna), a także z drewna drzew tropikalnych (np. azobe). Chociaż charakteryzuje je dobra sprężystość, są stopniowo zastępowane przez podkłady betonowe.

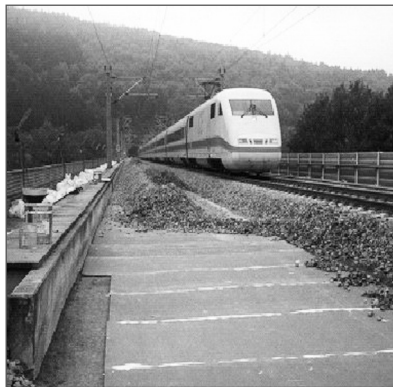
**Podsypka** jako element nawierzchni kolejowej przenosi obciążenie, odprowadza wodę z otoczenia podkładów i torowiska oraz zapewnia opór przeciwko odkształceniom ramy toru, a jednocześnie umożliwia regulowanie położenia geometrycznego toru. Jest ona najbardziej podatnym na odkształcenia elementem nawierzchni. Przy dobrym stanie podtorza udział podsypki w odkształceniach toru sięga 80–90% [38]. Grubość warstwy podsypki w przekroju pod szyną zmienia się w granicach 0,25–0,35 m. Jej zwiększenie ogranicza oddziaływanie na podtorze, lecz może być powodem większych odkształceń toru, jest więc uzasadnione w przypadku podłoża o większej sztywności (na przykład na mostach i wiaduktach oraz w tunelach). Potrzeby zwiększania grubości podsypki można uniknąć, stosując dodatkowe wzmocnienie torowiska (powierzchni styku warstwy podsypki z podtorzem).

Klasyczna konstrukcja nawierzchni, pracując w zakresie elastoplastycznym, kumuluje odkształcenia trwałe podsypki, co prowadzi w trakcie eksploatacji do zróżnicowania cech sprężystych i tłumienia na długości toru i w konsekwencji stwarza konieczność



regulacji położenia toru i niezbędnych napraw nawierzchni. W warunkach linii dużych prędkości wzrastają również przyspieszenia drgań szyn, podkładów, podsypki i podtorza, bowiem styk koła z szyną stanowi generator energii, która transmitowana jest przez szynę i jej przytwierdzenie do podkładu, po czym dalej, poprzez warstwę podsypki do podtorza. Na liniach DB przy prędkościach 250 km/h zarejestrowano drgania o prędkości 20–100 mm/s w zależności od stanu powierzchni kół [28]. Za ich sprawą na warstwę podsypki działają przyspieszenia kilkakrotnie przewyższające przyspieszenie ziemskie. Sprawia to, że w pewnych obszarach podsypka podlega naprężeniom rozciągającym, które zanikają dopiero na głębokości 600÷800 mm. Naruszona zostaje równowaga zapewniona przez siły tarcia wewnętrznego, w wyniku czego następuje dekonsolidacja podsypki [6]. Dodatkowo obniża się zdolność podsypki do przenoszenia naprężeń rozciągających.

Część podsypki usytuowana bezpośrednio pod podkładem jest najbardziej narażona na obciążenia eksploatacyjne i oddziaływanie robót utrzymaniowych (zwłaszcza związanych z regulacją położenia toru). W tej strefie następuje jej rozkruszenie. Warstwa granicząca z torowiskiem jest mniej narażona na oddziaływania dynamiczne, jednak gromadzą się w niej drobne frakcje, co wpływa na zmniejszenie zdolności filtracyjnej. W celu zmniejszenia sztywności nawierzchni na liniach dużych prędkości układa się dodatkowo pod warstwą podsypki maty SBM (*Sub Ballast Mats*) o sztywnościach 0,01–0,06 N/mm<sup>2</sup> (rys. 14). Znaczna podatność podsypki na odkształcenia i zanieczyszczenia skłania do poszukiwania sposobów jej wzmocnienia i ochrony, a także zastępowania klasycznej nawierzchni konstrukcjami, w których warstwa podsypki nie występuje.



Rys. 14. Układanie mat SBM pod warstwą podsypki w celu zmniejszenia sztywności nawierzchni linii dużych prędkości [http://pol.sika.com]

### **3.4. Konstrukcje nawierzchni niekonwencjonalnych (bezpodsypkowych) układanych na liniach dużych prędkości**

Powodem coraz częstszego układania na liniach dużych prędkości nawierzchni niekonwencjonalnych jest obok potrzeby zmniejszenia kosztów utrzymania drogi kolejowej

wej, także znacznie szybszy na tych liniach proces zużycia i wywiewania podsypki kolejowej (rys. 15), z czym wiąże się konieczność częstszej jej wymiany i uzupełniania. Stosowanie nawierzchni nowego typu początkowo nie wynikało ze względów ekonomicznych, lecz w miarę doskonalenia technologii produkcji elementów prefabrykowanych tych nawierzchni oraz rozwoju technologii układania możliwe stało się obniżenie kosztów budowy w porównaniu z nawierzchniami klasycznymi. W celu zapewnienia odpowiedniej pracy konstrukcji w zakresie pionowych odkształceń sprężystych, należało wyeliminować warstwę podsypki, a podłoże szyny zaprojektować jako ustrój wielowarstwowy, w którym wartości modułów odkształcenia poszczególnych warstw zmniejszają się wraz z głębokością. Wymagało to takiego doboru materiału i grubości poszczególnych warstw, aby całość pracowała w zakresie odkształceń sprężystych. Analiza rozkładu naprężeń w podłożu wskazuje na zanikanie naprężeń rozciągających na głębokości przekraczającej 800 mm od spodu stopki szyny, a charakter rozkładu naprężeń zależy od sztywności poszczególnych warstw.

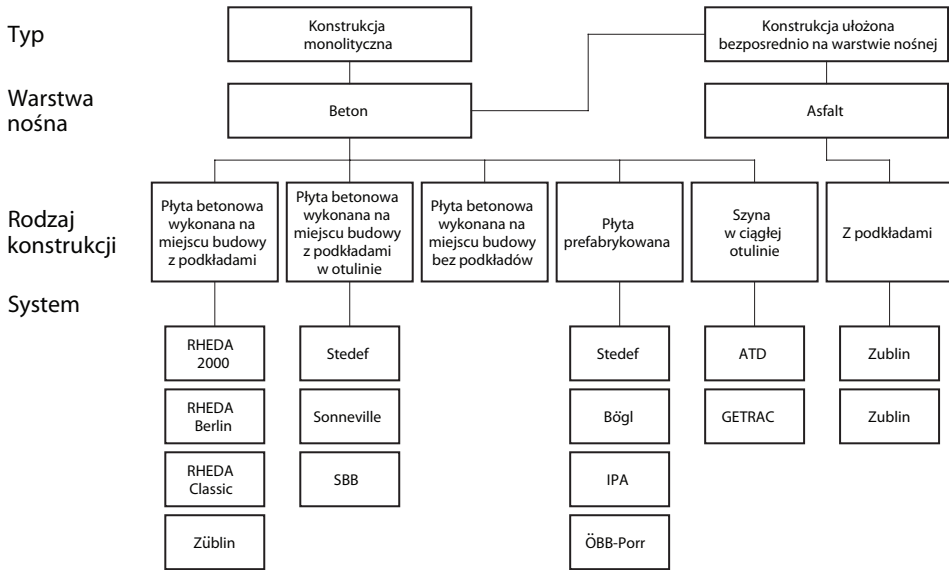


Rys. 15. Zjawisko wywiewania ziaren tłucznia podczas przejazdu pociągu z dużą prędkością [41]

Wśród niekonwencjonalnych nawierzchni rozróżniane są konstrukcje monolityczne z ciągłym podparciem szyny oraz konstrukcje z punktowym podparciem szyn. W obu rozważaniach częścią składową konstrukcji jest ruszt toru (dwa toki szynowe z przytwierdzonymi do nich podkładami). Na rysunku 16 pokazano przykład klasyfikacji niekonwencjonalnych konstrukcji nawierzchni układanych na liniach dużych prędkości.

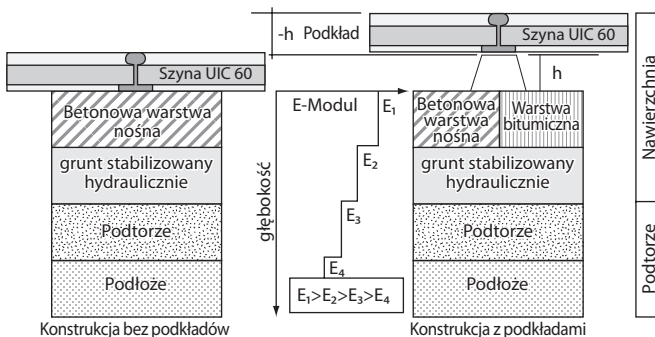
Jednym z miejsc, w których zastosowano nawierzchnię bezpodsypkową, jest linia ICE Kolonia – Frankfurt n. Menem, gdzie układane są konstrukcje stanowiące warianty rozwiązania *Rheda*. Również na linii HSL-Zuid w Holandii ułożono nawierzchnię typu *Rheda* 2000 (Pflaiderer AG). Uzasadnia się tę decyzję uzyskaniem dobrej stateczności położenia toru, jego niewrażliwością na działanie sił podłużnych pojawiających się wskutek ogrzania szyn prądami wirowymi przy hamowaniu, dużą trwałością konstrukcji (60 lat) oraz mniejszymi kosztami utrzymania budowy pomimo zróżnicowanego podłoża (mosty, tunele, podtorze ziemne, podłoże rozjazdów) [22].

Nawierzchnię niekonwencjonalną konstruuje się w ten sposób, że każdy kolejny niżej położony element ma mniejszą sztywność od poprzedniego. Elementami tymi są:



Rys. 16. Przykład klasyfikacji bezpodsykowych konstrukcji nawierzchni układanych na liniach dużych prędkości [6]

szyna, przytwierdzenie, podkład, betonowa warstwa nośna BTS lub warstwa stabilizowana asfaltem ATS, warstwa stabilizowana hydraulicznie HTG, warstwa mrozoodporna FSS oraz podtorze (rys. 17). W rozwiązaniach niemieckich przewidziano betonowe (BTS) oraz bitumiczne (ATS) warstwy nośne. Oprócz obciążeń eksploatacyjnych, przy projektowaniu betonowej warstwy nośnej uwzględnia się wpływ zmian naprężeń oraz zmian temperatury. Aby zapobiec powstawaniu pęknięć o szerokości większej od 0,5 mm, przewiduje się podłużne zbrojenie płyty betonowej (0,8 do 0,9% przekroju poprzecznego BTS). Pomiędzy podtorzem gruntowym i warstwami nośnymi układa się warstwę materiału stabilizowanego spoiwem hydraulicznym (HGT) oraz warstwę mrozoochronną FSS spoczywającą na podtorzu gruntowym.



Rys. 17. Sposób wymiarowania wielowarstwowych konstrukcji nawierzchni bezpodsykowych na kolejach niemieckich [42]

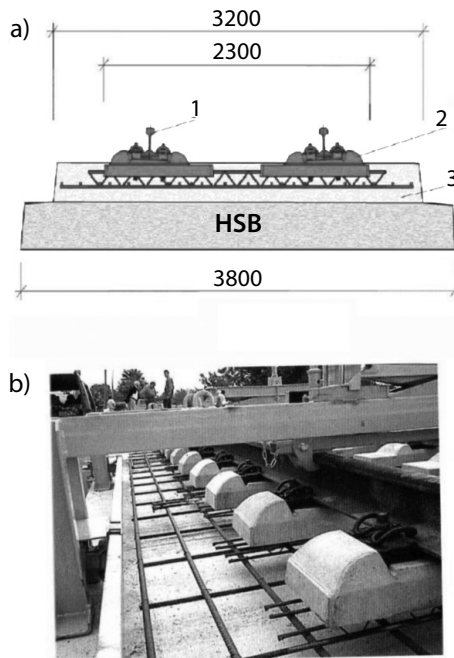
Całość niekonwencjonalnej konstrukcji tego typu składa się więc z **właściwej nawierzchni** (szyna, przytwierdzenie, podkład stanowiący punktowe podparcie szyny lub podparcie ciągłe płytą betonową, betonowa warstwa nośna lub warstwa stabilizowana hydraulicznie) oraz **podłoża** obejmującego warstwy ochronne, w tym górną warstwę mrozoochronną oraz niezwiązaną warstwę gruntu zagęszczonego lub niesortu, spoczywającą na gruncie rodzimym. Mrozoochronne warstwy stanowią pośredni element umieszczony między warstwą związaną i gruntem podtorza. Wykonuje się je z łamanej pospółki. Do głębokości 200 mm powinny mieć współczynnik filtracji większy niż  $10^{-4}$  m/s, a poniżej większy niż  $0^{-5}$  m/s. Moduł odkształcenia mierzony na powierzchni warstwy mrozoochronnej, w przypadku nowobudowanych linii, powinien wynosić co najmniej 120 MPa, a dla linii modernizowanych 100 MPa.

Konstrukcję wymiaruje się tak, aby rozkład obciążeń następował pod kątem 45 stopni. Minimalną długością podkładu jest 2,20 m. Szerokość konstrukcji wynika z obliczeń poszczególnych warstw nośnych. Dla linii dużych prędkości wymagana szerokość warstwy stabilizowanej hydraulicznie wynosi 3,80 m [13]. Cykl życia projektowanej konstrukcji zdefiniowany jest w normie europejskiej EN 50126 (*European Standard for Railway Applications*) i przewiduje 14 faz – od koncepcji do konstrukcji w okresie od ułożenia do wymiany.

W procesie wymiarowania nawierzchni bezpodsypkowych nie narzuca się sposobu podparcia szyny, jednak w przypadku układania szyn na podkładach, te ostatnie umieszcza się na warstwie betonu lub warstwie stabilizowanej asfaltem. Konstrukcje z betonową warstwą nośną mogą być wykonywane na miejscu albo z zastosowaniem płyt lub ram prefabrykowanych. Warstwa wykonywana na miejscu jest zbrojona i betonowana na całej długości (rys. 18). Może mieć przekrój prostokątny lub w formie koryta. Przy ciągłym podparciu ruszt toru jest integralną częścią betonowej lub bitumicznej warstwy nośnej. Dzięki zakotwieniu podkładów możliwe jest przenoszenie oddziaływań bocznych. Ostatnio opracowano również rozwiązanie z betonową warstwą nośną przy zmniejszonym odstępie podparcia szyny, lecz z wyeliminowaniem podkładów.

Grubość hydraulicznie stabilizowanej warstwy nośnej określa się na podstawie wymiarowania całej konstrukcji. Z reguły oddziela się niezwiązaną górną warstwę podtorza ziemnego (które w górnej warstwie powinno mieć moduł odkształcenia co najmniej 120 MPa) od warstwy nośnej (betonowej lub stabilizowanej bitumem), która ma zapobiegać przekroczeniu nośności podtorza pod oddziaływaniem obciążeń eksploatacyjnych. Odsłonięte boczne powierzchnie warstwy są pokrywane bitumem lub zabezpieczane w inny sposób przed wpływami atmosferycznymi.

Przy wymiarowaniu nawierzchni niekonwencjonalnych przyjmuje się obciążenie określone w TSI: układ sił pionowych 250 kN oraz obciążenie rozłożone 80 kN/m. Pionowe siły statyczne od koła pojazdu zwiększa się, przyjmując współczynnik bezpieczeństwa równy 1,5, a dla sił bocznych 1,2. Sprężystość podparcia szyny ogranicza się, aby nie dopuścić do przekroczenia naprężeń ściskających i rozciągających w szynach, przy założeniu, że ugięcie szyny nie może przekroczyć 1,5 mm pod działaniem nacisku osi

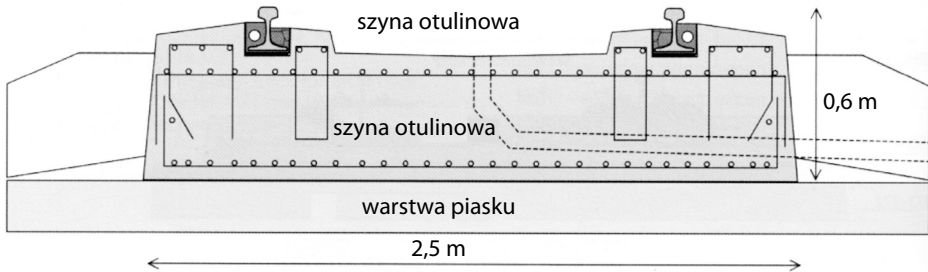


Rys. 18. Nawierzchnia typu *Rheda* stosowana na nowych liniach dużych prędkości:  
 a) przekrój poprzeczny: 1 – szyna 60E2, 2 – przytwierdzenie firmy Vossloh, 3 – warstwa betonu;  
 b) podłużne i poprzeczne zbrojenie konstrukcji przed zalaniem masą betonową [42]

równego 200 kN. Sztywność konstrukcji powinna wynosić  $64 \pm 5$  kN/mm. Nachylenie poprzeczne szyn przyjmowane jest najczęściej jako 1:40 z odchyłką  $\pm 15\%$ , a w rozwiązaniach holenderskich również 1:20. Przy prędkości ponad 230 km/h szerokość toru powinna mieścić się w granicach 1435–1437 mm.

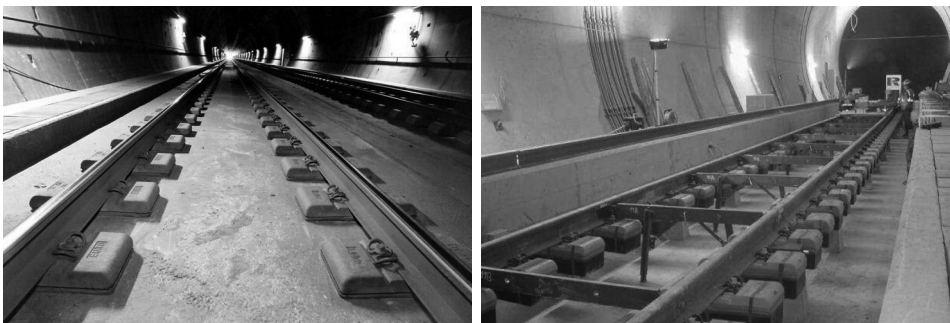
W nawierzchniach bezpodsypekowych do najczęściej stosowanych przytwierdzeń należą: system 300 firmy Vossloh, RTS oraz *Nabla* i *Sonneville*. Przytwierdzenia muszą umożliwiać regulację położenia toru: w poziomie w granicach  $\pm 8$  mm, a w pionie do 30 mm (w przypadku przytwierdzenia firmy Vossloh możliwa jest regulacja wysokości w zakresie do 56–60 mm, dlatego stosuje się je na odcinkach przejściowych oraz na mostach i w tunelach). Stosowane łapki i elementy sprężyste różnych typów mają siłę trzymania rzędu 20 kN i opory podłużne od 9 kN. Z licznych rozwiązań opracowanych dla kolei niemieckich wymienić należy nawierzchnię typu *Rheda*, układaną na nowych liniach dużych prędkości. Jest to konstrukcja mająca podkłady wtopione w płytę. Płyta nośna w kształcie koryta betonowego jest układana na warstwie betonu grubości 150 mm. Pomiędzy płytą i korytem umieszcza się folię grubości 2 mm. Szyny przytwierdza się do podkładów dwublokowych rozmieszczonych w korycie i zabetonowanych. Zrezygnowano ze zbrojenia poprzecznego, ponieważ jego rolę spełniają stalowe łączniki podkładów. Zbrojenie podłużne rozmieszczono po wewnętrznej i zewnętrznej stronie i przyspawano do zbrojenia bloków podkładów.

Zainteresowanie nawierzchniami bezpodсыpkowymi przejawiają również inne zarządy kolejowe. Badane są rozwiązania odmienne od opracowanych przez DB. Przykładem takiego rozwiązania, opracowanego w Holandii, jest nawierzchnia z płyt grubości 420 mm zbrojonych podłużnie, o dużej odporności na zginanie (rys. 19). Szyna jest oparta w sposób ciągły na warstwie masy korkowo-polimerowej i jest nią otulona. W nowszych wariantach szynę UIC 54 zastąpiono szyną SA 42 o nietypowym profilu, uzyskując dzięki temu zmniejszenie emisji akustycznej o 5 dB [25].



Rys. 19. Nawierzchnia z płyt betonowych układana na liniach dużych prędkości w Holandii [42]

Konstrukcje nawierzchni bezpodсыpkowej o większej sztywności w porównaniu z nawierzchnią klasyczną są miejscem zwiększonych oddziaływań wibroakustycznych. Najczęściej stosowane rozwiązania ograniczające drgania to maty z tworzywa sztucznego, wykładziny i wkładki tłumiące drgania z betonów porowatych, tufów wulkanicznych i tworzyw sztucznych oraz wkładki sprężyste z tworzyw i otuliny gumowe szyn i innych stalowych elementów nawierzchni (np. system LVT – rys. 20). Ograniczeniu drgań w nawierzchni służą również warstwy stanowiące ochronę antywibracyjną torowiska, układane pod podsypką w postaci geowłóknin i geosiatek, płyt gumowych itp. Bardzo skutecznym, lecz kosztownym rozwiązaniem antywibracyjnym jest układanie elementów stanowiących rodzaj oscylatora harmonicznego o niewielkiej częstotliwości drgań własnych (tzw. *floating-slab-system*).



Rys. 20. Nawierzchnia systemu LVT z zastosowaniem antywibracyjnej warstwy ochronnej pod podsypką, układana w tunelu [http://pol.sika.com]

W świetle dotychczasowych doświadczeń można stwierdzić, że układanie konstrukcji bezpodсыpkowych 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. W miarę doskonalenia technologii produkcji elementów prefabrykowanych oraz metod budowy nowych nawierzchni możliwe jest obniżenie ich kosztu w stosunku do kosztu nawierzchni klasycznej. 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 ma to miejsce w przypadku nawierzchni klasycznej. Budowa nawierzchni bezpodсыpkowych wymaga ponadto stosowania zaawansowanych technologii i dużej dokładności robót.

Nawierzchnie bezpodсыpkowe można układać na podłożu ziemnym pod warunkiem właściwego zagęszczenia gruntu. Nie spełniają tego warunku nasypy powyżej 10 m wysokości, głębokie przekopy wykonywane w gruntach spoistych (na przykład iłach), grunty podatne na osiadanie przy zawilgoceniu (lessy, gipsy) oraz nasypy na podłożu szczególnie podatnym na odkształcenia (na przykład na torfach). Obecnie nawierzchnie bezpodсыpkowe są układane przede wszystkim na nowych i modernizowanych liniach dużych prędkości.

### 3.5. Podtorze linii dużych prędkości

Podtorza kolejowego nie traktuje się jako obiektu mającego spełnia wymagania interoperacyjności [39]. Może być ono wykonywane zgodnie z przepisami danego kraju. Znaczy to, że nie narzuca się określonych przekrojów poprzecznych pod warunkiem spełnienia wymagań dotyczących sztywności i własności wibroakustycznych toru, minimalnej szerokości międzytorzy oraz zasad utrzymania. Na liniach dużych prędkości szczególnie ważne jest zapewnienie równomierności osiadania toru w eksploatacji. Różnice nie mogą przekraczać 10 mm na długości 10 m [39]. W nawierzchniach niekonwencjonalnych na ich ograniczenie pozwala możliwość regulowania położenia konstrukcji. Dotrzymanie tego warunku jest często bardzo trudne z uwagi na zróżnicowanie budowy geologicznej oraz warunków gruntowo-wodnych i klimatycznych terenów, przez które przebiega nowa linia.

W celu zwiększenia stateczności podtorza stosuje się mniejsze pochylenia skarp oraz materiały i środki wzmacniające grunt. Jeżeli grunty są bardzo słabe, bardzo często układa się nawierzchnię na obiektach inżynieryjnych, co umożliwia przenoszenie obciążeń na głębiej położone, stabilne warstwy podłoża. Przystosowanie istniejącego podtorza do dużych prędkości wymaga odpowiedniego doboru materiałów i środków wzmacniających nasypy oraz szczegółowej oceny miejsc występowania słabych gruntów.

Wykorzystanie przy budowie linii dużych prędkości istniejącego wcześniej podtorza jest często utrudnione ze względu na zbyt wąskie torowiska. Ich poszerzenie nie jest

łatwe ze względu na niejednorodność podtorza, problemy związane z łączeniem części dobudowanej i istniejącej lub konieczność wydłużenia konstrukcji istniejących budowli inżynierskich. W związku z tym zakłada się, że stare podtorze może być dostosowane do prędkości 160–200 km/h, natomiast przy większych prędkościach podtorze powinno być wykonywane w całości jako nowe. Należy również pamiętać, że przy prędkościach przekraczających 100 km/h zjawisko narastania drgań w torze i podtorzu może prowadzić do rozluźnienia się ziaren gruntu i zwiększonych pionowych odkształceń toru. Zależy to od prędkości rozchodzenia się fal powierzchniowych (fal Rayleigha). Krytyczna prędkość tych fal, zależna od rodzaju ośrodka gruntowego, decyduje o ograniczeniu prędkości pociągów. W przypadku słabych gruntów (namulów, piasków o małej nośności, pyłów i glin w stanie uplastycznionym) krytyczna prędkość fal Rayleigha wynosi 29–73 m/s, a dopuszczalna prędkość pociągów nie powinna przekraczać 121 km/h. Przy przeciętnych gruntach prędkość fal wynosi 115 m/s, co ogranicza prędkość pociągów do 269 km/h. W dobrych gruntach prędkości krytyczne wynoszą 146–258 m/s, a pociągi mogą osiągać nawet 320 km/h. Jak stwierdzono, przekroczenie prędkości krytycznej rozchodzenia się fal o 50% może spowodować nadmierne odkształcenia toru, a przekroczenie o 70% powoduje już duże odkształcenia, których nie można usunąć przez zwiększanie grubości warstwy podsypki. Konieczne jest wówczas wzmocnienie lub przebudowa podtorza i podłoża [39].

Podtorze na liniach dużych prędkości powinno mieć większą wytrzymałość, a jego górne warstwy powinny być zabezpieczone przed oddziaływaniem zwiększonych drgań. Podłoże musi mieć określoną sztywność (dla gruntów spoistych  $E_0 \geq 45$  MPa, dla gruntów niespoistych  $E_0 \geq 60$  MPa). Uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości wymaga użycia odpowiednich gruntów i ich dobrego zagęszczenia. Grubość górnej warstwy podtorza utworzonej z nadającego się do tych celów gruntu przyjmuje się najczęściej jako 1 m. Można ją niekiedy zmniejszyć do 0,45 m, na przykład przy jednorodnych żwirach, pospółce i piaskach i do 0,60 m przy piaskach pylastych i gliniastych. Stosowane nachylenia skarp podtorza wynoszą od 1:1,8 do 1:3, przy nasypach o wysokości do 6 m – 1:2. Nachylenia te powinny wynikać z analizy stateczności budowli ziemnej.

Budowa podtorza na liniach dużych prędkości wymaga dokładnego rozpoznania warunków geologiczno-inżynierskich, wykonywanego w kilku etapach: wstępnego rozpoznania terenu, badań wstępnych (wiercenia co 500 m na głębokość do 2,0 m) oraz badań lokalizacyjnych (wiercenia co 200–300 m z pobieraniem próbek). Przygotowanie podłoża gruntowego dla nawierzchni niekonwencjonalnych wymaga wykonania licznych badań właściwości gruntu i oceny jego nośności. W celu uzyskania wymaganych modułów odkształcenia stosowane jest dodatkowe zagęszczanie, stabilizacja gruntu (np. cementem), a nawet jego wymiana. Trzeba podkreślić, że budowa nawierzchni bezpodsypkowych na podtorzu ziemnym wymaga dobrego odwodnienia i zachowania warunków nośności górnej warstwy, określonych wartością modułu odkształcenia.

W celu ograniczenia oddziaływań wibroakustycznych pociągów na liniach dużych prędkości stosowane są **podtorowe maty wibroizolacyjne** produkowane z tworzyw



sztucznych lub gumy, w postaci gotowych koryt lub arkuszy o różnych profilach. Uważa się, że skuteczność stosowania mat układanych pod nawierzchnią z warstwą podsypki jest najlepsza w przypadku drgań o częstotliwości  $\geq 63$  Hz, a pod konstrukcjami niekonwencjonalnymi przy  $\geq 30$  Hz. Rozróżnia się **maty podtorowe** układane pod warstwą podsypki (SBM<sup>4</sup>, USM<sup>5</sup>) oraz układane pod płytami betonowymi (STM<sup>6</sup>, LMFS<sup>7</sup>). Te pierwsze również mogą być układane pod płytami. Dla mat określa się sztywność statyczną  $C_{stat}$  (statyczny moduł podłoża) oraz sztywność dynamiczną  $C_{dyn}$ . Stosunek sztywności dynamicznej do statycznej nazywany jest **współczynnikiem usztywnienia dynamicznego**. Statyczną sztywność mat wybiera się w zależności od maksymalnego nacisku osi oraz dopuszczalnej prędkości jazdy. Przy dużych prędkościach, powyżej 200 km/h i naciskach powyżej 160 kN przy nawierzchniach z warstwą podsypki, zalecana jest sztywność statyczna w granicach 0,10–0,15 N/mm<sup>2</sup>. Matę powinien również cechować możliwie niski współczynnik usztywnienia (1,3–2,2). Grubość maty mieści się w granicach 5–50 mm. Dodatkowo przy wyborze materiału maty uwzględnia się dopuszczalną wartość ugięcia szyny i częstotliwość drgań własnych obiektu [39]. W przypadkach, gdy drgania powodowane przejazdem pociągów oddziałują negatywnie na budowlę znajdującą się w pobliżu toru, stosuje się specjalne **wibroizolatory** tłumiące zarówno drgania akustyczne o dużych częstotliwościach, jak i o niższych (10–30 Hz), wywołujących drgania rezonansowe ścian i stropów budynków. Jednocześnie drgania własne nawierzchni są utrzymywane na niskim poziomie (4–8 Hz).

## 4. UKŁAD GEOMETRYCZNY LINII KOLEJOWYCH DUŻYCH PRĘDKOŚCI

### 4.1. Skrajnia budowli oraz układ geometryczny linii dużych prędkości

Transeuropejski system kolei dużych prędkości rozróżnia linie różnych kategorii [18, 45]. W specyfikacji TSI wprowadza się podział na [14]:

- linie kolejowe kategorii I, nowe, przeznaczone do prowadzenia ruchu z prędkościami  $\geq 250$  km/h,
- linie kolejowe kategorii II, w wyniku modernizacji przystosowane do prędkości 200 km/h,
- linie kolejowe kategorii III, nowe lub przystosowane do dużych prędkości, na których występują ograniczenia prędkości spowodowane topografią, zagospodarowaniem terenu itp.

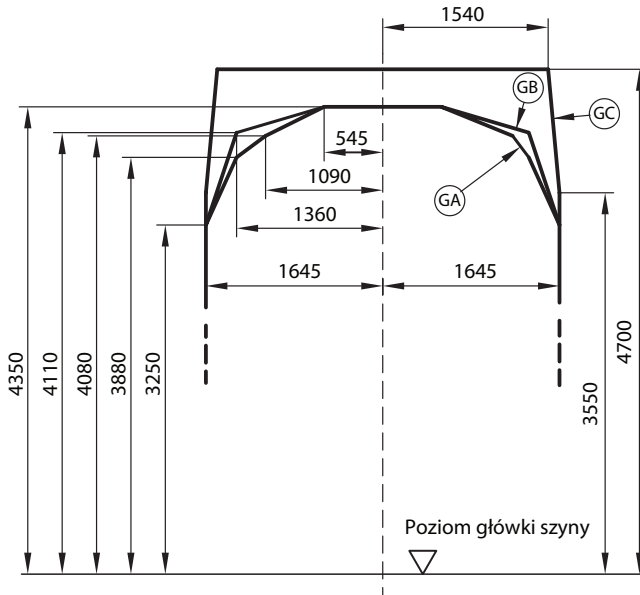
<sup>4</sup> SBM – *Sub Ballast Mats*.

<sup>5</sup> USM – *Unterschottermatte*.

<sup>6</sup> STM – *Slab Track Mats*.

<sup>7</sup> LMFS – *Leichten Masse Feder System*.

Na liniach tych mogą kursować pociągi o długości 400 m i masie do 1000 ton. Wybór parametrów technicznych uzależniony jest od prędkości dopuszczalnej na danym odcinku linii (nie większej niż 350 km/h). Minimalna skrajnia budowli dla linii kategorii I, odpowiada kinematycznej skrajni GC (skrajnię pantografu i odstępu izolacyjnego określa TSI „Energia”), rysunek 21. Dla linii kategorii II i III w przypadkach uzasadnionych ekonomicznie skrajnię budowli można przyjmować na podstawie referencyjnej skrajni kinematycznej GB.



Rys. 21. Wymiary górnej części kinematycznych skrajni budowli GC mających zastosowanie na liniach dużych prędkości [12]

Odległość między osiami torów przyjmowana jest następująco, zależnie od prędkości jazdy:

- dla  $230 \text{ km/h} < V \leq 250 \text{ km/h}$  – 4,00 m,
- dla  $250 \text{ km/h} < V \leq 300 \text{ km/h}$  – 4,20 m,
- dla  $V > 300 \text{ km/h}$  – 4,50 m (ocenia się, że zwiększenie tego rozstawu do 4,80, na przykład ze względu na przewozy kombinowane, powiększy koszty budowy linii o co najmniej 1%).

Podane odległości mogą być zwiększane w przypadku kursowania po linii taboru, który nie odpowiada warunkom określonym dla linii dużych prędkości, albo w sytuacji, gdy należy zapewnić określoną spokojność jazdy lub wymaga tego utrzymanie linii.

Minimalny promień łuku poziomego wybierany jest tak, aby przy uwzględnieniu profilu toru nie została przekroczona dopuszczalna wartość niedoboru przechyłki. Przy projektowaniu eksploatowanych już linii, na których odbywa się ruch z prędkościami 250–300 km/h, przyjęto dopuszczalne przyspieszenia boczne od  $0,21 \text{ m/s}^2$  (np. na linii

Paryż – Lyon) do  $0,75 \text{ m/s}^2$  (na linii *Tokaido*), a minimalne promienie łuków poziomych od 2500 m do 7000 m. Krzywe przejściowe wykonuje się zazwyczaj jako parabole trzeciego stopnia, rzadziej jako parabole zmodyfikowane, a tylko wyjątkowo jako cosinusoidy. Przy projektowaniu krzywych przejściowych wartości przyrostu przyspieszenia mieszczą się w granicach  $0,30\text{--}0,70 \text{ m/s}^3$ , natomiast prędkości podnoszenia się koła podczas jazdy po rampie przechyłkowej od 28 mm/s do 49 mm/s [2]. Wartości przechyłki ograniczane są zasadniczo do 180 mm (wyjątkowo może być ona zwiększona do 200 mm), a jej minimalną wartością jest 20 mm.

Na liniach kategorii I wartości niedoboru przechyłki przyjmuje się w zależności od dopuszczalnej prędkości jazdy:

- dla  $200 < V \leq 230 \text{ km/h}$  – od 120 do 165 mm (na liniach kategorii II maksymalnie 140 mm, a na liniach kategorii III do 165 mm),
- dla  $230 < V \leq 250 \text{ km/h}$  – od 100 do 150 mm (na liniach kategorii II maksymalnie 130 mm, a na liniach kategorii III 150 mm),
- dla  $250 < V \leq 300 \text{ km/h}$  – od 100 do 130 mm (w przypadku nawierzchni bezpodsypekowych do 150 mm),
- dla  $V > 300 \text{ km/h}$  – 80 mm.

Niedobór przechyłki dla torów zwrotnych rozjazdów przyjmowany jest w zależności od prędkości jazdy pociągów po tym torze:

- dla  $30 < V \leq 70 \text{ km/h}$  – 120 mm,
- dla  $70 < V \leq 170 \text{ km/h}$  – 105 mm,
- dla  $170 < V \leq 230 \text{ km/h}$  – 85 mm.

## 4.2. Warunki utrzymania linii dużych prędkości

Jakość geometryczna toru jest oceniana na podstawie ekstremalnych wartości izolowanych odkształceń toru i ich odchyłeń standartowych (obliczanych dla określonego odcinka toru) oraz na podstawie średnich wartości nierówności [1, 14, 20]. Nierówności ocenia się w odniesieniu do maksymalnych wartości odchyłek od wartości średniej – dla nierówności pionowych w trzech przedziałach długości fal odkształcenia  $\lambda$ : D1 ( $3 < \lambda \leq 25 \text{ m}$ ), D2 ( $25 < \lambda \leq 70 \text{ m}$ ), D3 ( $70 < \lambda \leq 150 \text{ m}$ ), a dla nierówności poziomych – tylko dla przedziału D3. Ustalono 3 granice odchyłek:

- odchyłki, których przekroczenie wymaga oceny, czy potrzebne jest wykonanie robót utrzymania – poziom AL (*Alert Limit*), określony jako granica wczesnego ostrzegania lub granica czujności;
- odchyłki, których przekroczenie wymaga wykonania napraw zapobiegających dalszemu narastaniu odkształceń – poziom IL (*Intervention Limit*), czyli granica działań planowych;
- odchyłki, których przekroczenie zwiększa już ryzyko wykolejenia, co wymaga wykonania naprawy, ograniczenia prędkości lub wyłączenia toru z ruchu – poziom IAL (*Immediate Action Limit*), określane jako granica działań bezpośrednich [1].

Odchylenia standardowe nierówności wykorzystuje się w ocenie jakości toru jedynie w przypadku poziomu AL. W tabelicy 1. zestawiono wartości odchyłek dopuszczalnych przyjmowane dla różnych poziomów interwencji utrzymaniowych. Dla linii, na których prowadzi się ruch z prędkościami do 250 km/h włącznie, maksymalną wichrowatość oblicza się następująco:

$$w_{\max} = 20/l + 3 \text{ dla } 5 \leq l < 20 \text{ m}$$

$$w_{\max} = 7\% \text{ dla } 1,3 \leq l < 5 \text{ m}$$

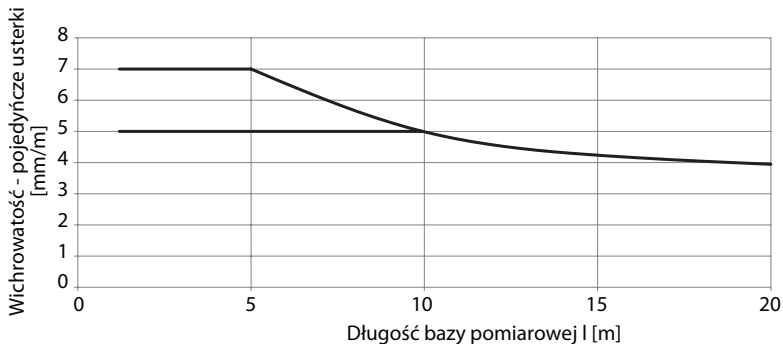
gdzie  $l$  jest długością bazy pomiarowej [m].

Tabela 1

### Dopuszczalne odchyłki geometrycznych parametrów toru.

Prędkość [km/h]	Parametr		AL	IL	IAL	Uwagi
230 < V ≤ 300	odchyłki szerokości toru		-3; +20 mm	-4; +23 mm	-5; +28 mm	według TSI -5; +28 mm
	Nierówności pionowe	D1	6-10mm	8-12 mm	16 mm	
		D2	12-18mm	16-20 mm	28 mm	
	Odchylenia standardowe nierówności pionowych	D1	1,0-1,5			
Nierówności poziome	D1	4-7 mm	6-8 mm	10 mm		
	D2	8-13 mm	12-14 mm	20 mm		

Decyzja [14] podaje maksymalną wartość wichrowatości dla prędkości do 200 km/h równą 7 mm/m, a dla większych prędkości 5mm/m. Na rysunku 22 pokazano zależność  $w_{\max}$  od długości  $l$ .

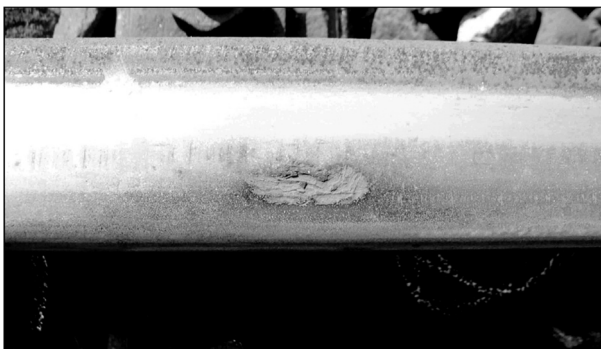


Rys. 22. Ocena wichrowatości toru przy różnej długości bazy pomiarowej [14]

W utrzymaniu nawierzchni, do charakterystycznych wad i uszkodzeń szyn obserwowanych w torach linii dużych prędkości obok ich zużycia falistego, należą uszkodzenia kontaktowo-zmęczeniowe główki szyny. Często występujące uszkodzenia określane jako *head checks* najczęściej obserwuje się w torach położonych w łukach (rys. 23). Są to ukośne nadpęknięcia wewnętrznej, zaokrąglonej powierzchni główki szyny, występujące podpowierzchniowo i rozwijające się do głębokości 15 mm pod kątem do powierzchni toczonej szyny. Wady te o charakterze zmęczeniowym są powodem pęknięć poprzecznych propagujących się w szynie pionowo, co może doprowadzić do złamania szyny w niedającym się przewidzieć momencie. W obszarze występowania wady obserwuje się charakterystyczne wyblyszczzenie powierzchni toczonej szyny.



Rys. 23. Wada powierzchniowa (*head checks*) w postaci ukośnych nadpęknięć na wewnętrznej krawędzi szyny [42]

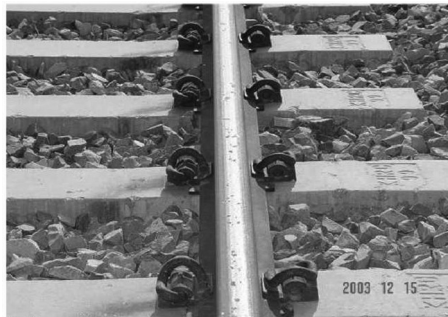


Rys. 24. Wada typu *squat* mogąca spowodować rozwarstwienie główki szyny [42]

Wady określane jako *squat* obserwowane są najczęściej w torze prostym. Są to pojedyncze lub połączone z sobą pęknięcia podpowierzchniowe rozwijające się prawie poziomo na całej szerokości główki szyny (rys. 24). Mogą powodować rozwarstwienie główki na głębokości od 2 do 8 mm. Pod wadą może dojść do pionowego rozwoju pęknięć poprzecznych, co prowadzi do całkowitego złamania szyny. Wady typu *squat* i *head checks*, występujące na znacznej długości szyny, mogą powodować jej wielo-

krotne pęknięcia poprzeczne, prowadzące do wyłamania i wypadnięcia kawałków szyny. Wady te są wizualnie wykrywane podczas obchodów lub lokalizowane na podstawie analizy zapisu wideokamery wagonu pomiarowego. Likwidacja wad wymaga szlifowania szyn w celu usunięcia warstwy utwardzonej oraz wyrównania powierzchni.

Na liniach, na których odbywa się ruch z prędkościami przekraczającymi 200 km/h, obserwuje się wady zwane *belgropis* (rys. 25), nieujęte dotychczas w katalogu uszkodzeń szyn. Są to zagłębienia w postaci ciemnych plam, występujące na powierzchni główki szyny, mającej zazwyczaj również pęknięcia. Usunięcie tej wady wymaga szlifowania szyn na głębokość 1–2 mm.



Rys. 25. Uszkodzenia powierzchni szyny (*belgropis*) spowodowane przez ziarna podsypki wywiewane podczas przejazdu pociągów z dużymi prędkościami [41]

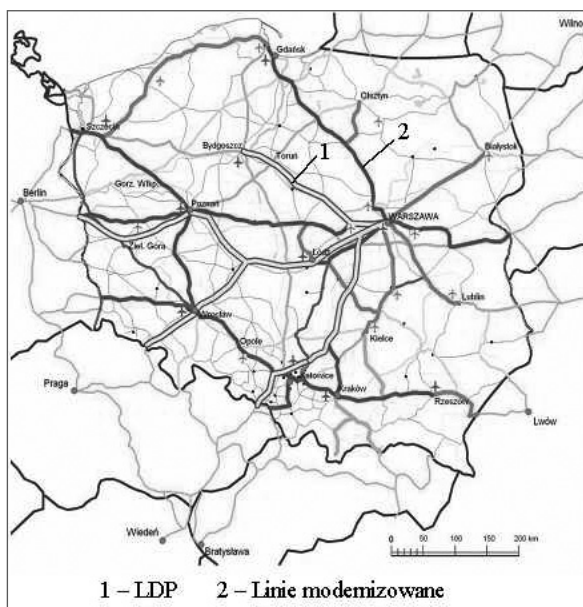
## 5. PROGRAM BUDOWY LINII DUŻYCH PRĘDKOŚCI W POLSCE

W wyniku podjętej w 2008 r. decyzji [43], rozpoczęto w Polsce realizację programu projektowania i budowy nowej linii dużych prędkości, łączącej Warszawę poprzez Łódź z Poznaniem i Wrocławiem z rozgałęzieniem w rejonie Kalisza, co tworzy układ w kształcie litery Y. Na nowej linii zastosowany zostanie system zasilania trakcyjnego 2 x 25 kV, 50 Hz z podstacjami trakcyjnymi rozmieszczonymi co 40–60 km i zasilanymi z wydzielonej linii energetycznej 220/400 kV AC. Linia będzie wyposażona w urządzenia sterowania ruchem ERTMS/ETCS drugiego poziomu [29].

Budowę nowej linii powiązano z projektem modernizacji kilku istniejących linii, przede wszystkim Centralnej Magistrali Kolejowej, która w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku została wybudowana na odcinku Grodzisk Mazowiecki – Zawiercie, z zachowaniem parametrów układu geometrycznego torów dopuszczających ruch z prędkością do 250 km/h. Pierwszy etap modernizacji tej linii, umożliwiający w praktyce osiągnięcie tej prędkości, będzie wymagał likwidacji przejazdów oraz wymiany istniejących rozjazdów typu UIC60-1:12-500 na rozjazdy typu UIC60-1:18,5-1200 oraz rozjazdy mające krzyżownice z ruchomymi dziobami. Oprócz miejscowych wygrodzień linii i napraw obiektów inżynierskich wymagana będzie także budowa przejść dwupoziomowych

oraz urządzeń chroniących środowisko – mostów ekologicznych, ekranów dźwiękochłonnych itp. Będzie również konieczna przebudowa sieci trakcyjnej (rozjazdów sieciowych i regulacji wysokości zawieszenia sieci, wzmocnień konstrukcji wsporczych itp.), jak również przystosowanie radiotelefonicznych sieci liniowych i wprowadzenia radi łączności w systemie GSM-R w paśmie 900 MHz. Drugi etap modernizacji, umożliwiający jazdę z prędkością do 300 km/h, będzie wymagał zmiany zasilania trakcyjnego oraz zastosowania systemu zabezpieczenia i sterowania ruchem pociągów zgodnego z ERTMS/ETCS.

Zapewnienie interoperacyjności nowej linii dużych prędkości z istniejącym układem kolejowym wymaga przystosowania do prędkości 200 km/h kilku innych linii, w tym odgałęzienia od CMK z Psar do Krakowa, połączenia Łodzi z Warszawą, a także w dalszej perspektywie linii Warszawa – Gdynia, Poznań – Szczecin i Warszawa – Białystok. Przystosowanie linii Poznań – Rzepin do prędkości 200 km/h umożliwi połączenie z siecią LDP zachodniej Europy. W ten sposób powstanie system LDP usprawniający całą sieć kolejową Polski (rys. 26).



Rys. 26. Proponowany w przyszłości układ nowobudowanych i modernizowanych linii dużych prędkości w Polsce [30]

Dalsze korzyści z realizacji programu to zmiana struktury sieci kolejowej, umożliwiająca specjalizację linii do określonych przewozów, skrócenie o połowę czasu przejazdu pomiędzy największymi aglomeracjami Polski, poprawę bezpieczeństwa w transporcie i zmniejszenie oddziaływania transportu na środowisko (zwłaszcza ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>).

## 6. PODSUMOWANIE

Szybka rozbudowa sieci linii dużych prędkości obserwowana obecnie na świecie wskazuje, że kolej w wewnątrz krajowych przewozach pasażerskich zwycięża w konkurencji z transportem lotniczym. Można więc uznać, że z obecnym rozwojem transportu kolejowego, również w zakresie linii dużych prędkości, wiąże się komercyjny sukces wielu krajów europejskich i pozaeuropejskich. Rozwój ten wynika z ciągłej optymalizacji istniejących układów linii dużych prędkości i obejmuje zarówno działalność badawczą, jak również rozwój infrastruktury i pojazdów szynowych, wpływając jednocześnie na rozwój technologii produkcji przemysłowej dla potrzeb kolei.

Wydaje się, że system linii dużych prędkości stanowi właściwe rozwiązanie, odpowiadające celom zrównoważonego rozwoju transportu w aspekcie zmian klimatycznych, ochrony środowiska, wymogów bezpieczeństwa oraz zużycia energii. Sprzyja także rozwojowi socjalnemu i ekonomicznemu społeczeństw. Rozwój sieci dużych prędkości, planowany w krajach różnych kontynentów, wymaga nowoczesnej infrastruktury oraz zwiększenia inwestycji w sektorze transportu publicznego, jak również modernizacji istniejącej sieci kolejowej. Sieć LDP zapewnia połączenia między największymi aglomeracjami, a dzięki budowie stacji pośrednich umożliwia również obsługę średnich miast.

Obserwacja rozwoju sieci LDP wskazuje na wzrost długości linii układanych na obiektach inżynierskich (mostach, wiaduktach i estakadach) oraz w tunelach. Również w projektowaniu układu linii stosowane są coraz większe promienie łuków poziomych, przekraczające już 7000 m. Eksploatuje się zarówno nawierzchnie klasyczne, jak również nawierzchnie bezpodsytkowe, układane przez niektóre koleje europejskie, przede wszystkim na nowobudowanych liniach. Nawierzchnie bezpodsytkowe wymagają w eksploatacji mniejszych nakładów na utrzymanie, narzucają jednak ostrzejsze warunki technologiczne w wykonawstwie oraz systemie nadzoru w eksploatacji.

Projektując przebieg nowej linii w Polsce, z uwagi na nizinny charakter kraju, możliwe będzie stosowanie dużych promieni łuków, przechyłek nie większych niż 140 mm i prędkości pionowego podnoszenia koła podczas jazdy po krzywych przejściowych nie przekraczających wartości przyjętych jako dopuszczalne. Jak wynika z badań prowadzonych na CMK, jakość położenia toru uzyskiwana po wymianie nawierzchni będzie odpowiadać warunkom określonym dla linii dużych prędkości.

W przyszłości należy oczekiwać, że rozwój LDP przyczyni się do dalszego zwiększenia interoperacyjności w transporcie szynowym, przejęcia przez nowe linie niektórych przewozów towarowych, a ze strony przemysłu – opracowania nowych technologii zwiększających komfort, a także bezpieczeństwo podróżowania oraz ograniczenie zużycia energii.



**BIBLIOGRAFIA**

1. Bałuch H., Bałuch M.: *Determinanty prędkości pociągów – układ geometryczny i wady toru*. Wydawnictwo Instytutu Kolejnictwa, Warszawa 2010.
2. Bałuch H., Bałuch M.: *Eksplatacyjne metody zwiększenia trwałości rozjazdów kolejowych*. CNTK, Warszawa 2009.
3. Bałuch H.: *Badawcze aspekty przygotowań do wprowadzenia w Polsce dużych prędkości pociągów*. Materiały Naukowo-Techniczne Konferencji „Nowoczesne technologie i systemy zarządzania w kolejnictwie”, Kraków 2008, s. 9 - 20.
4. Bałuch H.: *Problem uwzględniania anomalii w konstruowaniu nawierzchni kolejowej*. „Transport i Komunikacja” 2008, nr 2, s. 14–20.
5. Bałuch M.: *Interpretacja pomiarów i obserwacji nawierzchni kolejowej*. Monografie nr 79. Zakład Poligraficzny Politechniki Radomskiej, Radom 2005.
6. Basiewicz T., Gołaszewski A., Towpik K.: *Badania porównawcze nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym na odcinkach doświadczalnych*. Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRASZYN 2010”, Zakopane 2010, s. 34 - 52.
7. Basiewicz T.: *Nawierzchnia kolejowa z podkładami betonowymi*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1969.
8. Boryczka J., Raczyński J.: *Łódź – Warszawa jako część krajowego systemu kolejowych połączeń międzyregionalnych*. „Rynek Kolejowy” 2002, nr 2–3, s.40–41.
9. *Budowa linii dużej prędkości w Wielkiej Brytanii trafia na dziurę budżetową*. „Technika Transportu Szynowego”, 2010 nr 5–6 (tłumaczenie z International Railway Journal nr 4/2010).
10. Cejmer J.: *Badania i ocena systemu sprężystego przytwierdzenia szyn do podkładów strunobetonowych – SB*. „Prace CNTK”. Zeszyt 143, Warszawa, 2009.
11. Czyczuła W., Towpik K.: *Współczesny tor bezстыkowy – problemy modelowania i identyfikacji modeli*. „Problemy Kolejnictwa”, 1998, zeszyt 128.
12. Czyczuła W.: *Infrastruktura kolei dużych prędkości w technicznych specyfikacjach interoperacyjności (TSI)*. „Technika Transportu Szynowego”, 2006, nr 5–6, s.73–79.
13. Darr E., Fiebig W.: *Feste Fahrbahn*. „VDEI Schriftenreihe”, Eurailpress, 2008.
14. Decyzja Komisji Europejskiej 2008/217/WE dotycząca specyfikacji technicznej interoperacyjności podsystemu infrastruktura transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości. Dz.U. L 77 z 19.3.2008 r.
15. Decyzja Komisji Europejskiej 2008/232/WE z dnia 21 lutego 2008 r. dotycząca specyfikacji technicznej interoperacyjności, podsystemu Tabor transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości. Dz.U. L 84 z 26.3.2008 r.
16. Dyrektywa 2001/16/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 marca 2001 w sprawie interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych z dnia 20 grudnia 2007 r. Dz.U. L 110 z 20.4.2001.

17. Dyrektywa 2008/57/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 czerwca 2008 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei we Wspólnocie (przekształcenie). Dz.U. L191 z 18.7.2007.
18. Dyrektywa Rady 96/48/WE z dnia 23 lipca 1996 r. w sprawie interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości. Dz.U. L. 235 z 17.9.1996 r.
19. European Standard EN 13803-1: Railway applications – track – track alignment design parameters – track gauges 1435 mm and wider – part 1: plain track. CEN, Brussels, 11/2009.
20. European Standard EN 13848-5 Railway applications – Track – Track geometry quality – part 5: geometric quality levels. CEN, Brussels, 3/2008.
21. Fengler W. i in.: *Hochgeschwindigkeitsverkehr: Vorstudie zur Strecke Berlin-Budapest*. „Der Eisenbahningenieur”, 2008, nr 3, s. 35–43.
22. Freudenstein S., Obieray D.: *Lebenszykluskosten und strikte Regie sind entscheidend*. „PPP Infrastructure”, 2005 nr 1, s. 24–27.
23. Galvin P. i in.: *Induced Vibrations because of High-Speed Train Passage on Ballast and Non-Ballast Tracks*. Materiały X Konferencji „Computational Structures Technology, Walencja 2010.
24. Gautier P.E, Masson E., Paradot N.: *L'analyse de risque vents traversiers dans le project DeuFraKo „Aerodynamics in Open Air”*, „Revue Générale des Chemins de Fer”, 2009, nr 20, s. 33–47.
25. Girard H., Schmidt L.: *Experimental site on high speed line on Northern France for European Project Supertrack*. 5<sup>th</sup> International Conference „Railway Engineering”, London, 2004.
26. *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Pod red. Lothara Fendricha, Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
27. *In Italien entsteht ein Hochgeschwindigkeitsnetz*. „Schweizer Eisenbahn – Revue”, 2006, nr 8–9, s. 390–393.
28. Leykauf G., Lechner B., Stahl W.: *Improved ballasted track for high speed lines*. 6<sup>th</sup> International Conference „Railway Engineering”, London, 2005.
29. Lubowiński R.: *Program budowy linii dużych prędkości w Polsce*. Materiały III Konferencji Naukowo-Technicznej „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym INFRA SZYN 2010”, Zakopane 2010, s. 147–172.
30. Massel A.: *Koleje dużych prędkości na świecie – stan obecny i perspektywy rozwoju*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym”, Zakopane 2009, s. 187–197.
31. Massel A.: *Linia dużych prędkości Est Européen*. „Technika Transportu Szynowego”, 2007, nr 4, s.22–28.
32. Ożóg M.: *Interoperacyjność i standardy techniczne dla kolei dużych prędkości*. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITKom, Kraków 2010, nr 95.
33. PN-EN 13481 (1-7) *Kolejnictwo – Tor – Wymagania eksploatacyjne dla systemów przytwierdzeń*.

34. Prognoza oddziaływania na środowisko. Program budowy i uruchomienia przewozów kolejami dużych prędkości w Polsce. Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa 2008.
35. Raczyński J.: *Nowy rekord pociągu TGV – 574,8 km/h.* „Technika Transportu Szybowego”, 2007, nr 4, s. 18–21.
36. Rusak R.: *Pociągi dużych prędkości w Niemczech.* „Technika Transportu Szybowego”, 2007, nr 10.
37. Schoech W.: *Rail grinding strategies for achieving optimum results: an inventory*, REI, 2008, nr 1.
38. Skrzyński E.: *Podsypka i jej jakość.* „Problemy Kolejnictwa”, 1993, zeszyt 115.
39. Skrzyński E.: *Podtorze kolejowe.* Kolejowa Oficyna Wydawnicza, 2010, s. 110–120.
40. Sunaga Y., Sano I., Ide T.: *A method to control the short wave track irregularities utilizing axlebox acceleration.* „Quarterly Report of RTRI”, 1997, nr 4.
41. *The 1st UIC World High Speed Interaction Workshop.* Daejeon, Korea, 18–19 listopada 2009.
42. Towpik K.: *Infrastruktura drogi kolejowej. Obciążenia i trwałość nawierzchni.* Warszawa – Radom, Wydawnictwo Instytutu Problemów Eksploatacji, 2006.
43. Uchwała Nr 276/2008 Rady Ministrów z dnia 19 grudnia 2008 w sprawie przyjęcia strategii ponadregionalnej „Program budowy i uruchomienia przewozów kolejami dużych prędkości w Polsce”.
44. UIC 518 Kodex. *Fahrtechnische Prüfung und Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen.* Paris, 2000.
45. Ustawa z dnia 28 marca 2003 o transporcie kolejowym (Dz.U. Nr 86) ze zmianami z dnia 20 kwietnia 2004 (Dz.U. Nr 92).
46. Wiśniewski J.: *Misja Wschód – Zachód UIC.* „Rynek Kolejowy”, 2002, nr 2–3, s. 63.