

Wpływ wybranych czynników na pracę eksploatowanego betonowego podkładu kolejowego

Włodzimierz Andrzej Bednarek



dr hab. inż. Włodzimierz Andrzej Bednarek

Politechnika Poznańska
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zakład Budowy Mostów i Dróg Kolejowych

wlodzimierz.bednarek@put.poznan.pl

Głównym zadaniem podkładów kolejowych jest przejmowanie nacisków przekazywanych przez szyny i przenoszenie ich na podłoże podsypankowe [3,4,22,25]. Umożliwiają przytwierdzenie szyn z odpowiednim rozstawem oraz zapewniają dokładne utrzymanie szyn w ustalonej odległości odpowiadającej przepisowej szerokości toru kolejowego. Przesunięciom podkładów pod działaniem sił podłużnych i poprzecznych stawia opór podsypka oraz tarcie powstające między podsypką a podkładami. Pionowe obciążenia przekazywane na podkłady powodują oddziaływanie współpracującej podsypki [3,8]. Podczas eksploatacji podkładów kolejowych można wyodrębnić następujące czynniki: eksploatacyjne i konstrukcyjne, technologiczne i związane ze współpracą z podłożem podsypkowym. W dalszej części pracy starano się zwrócić uwagę głównie na te czynniki, które z przeprowadzonych obliczeń czy analiz wielu publikacji [3,4,5,9], mają istotne znaczenie dla prawidłowej pracy podkładu kolejowego.

Czynniki eksploatacyjne i konstrukcyjne

Do głównych czynników eksploatacyjnych i konstrukcyjnych można zaliczyć:

- prędkość pojazdów,
- naciski pojazdów,
- aktualny stan toru,
- stan i rodzaj przytwierdzeń [17,19],
- kształt podkładu.

Prędkość pojazdów wraz z naciskami od osi pojazdów powoduje zwiększenie oddziaływań dynamicznych na szyny i współpracujące ze sobą elementy nawierzchni kolejowej. Oddziaływania te ulegają zwiększeniu podczas postępującej degradacji nawierzchni kolejowej. Zwiększenie naprężeń, we współpracujących elementach nawierzchni kolejowej, w obliczeniach polega m.in. na uwzględnieniu współczynnika dynamicznego, zależnego m.in. od prędkości pojazdów czy syntetycznego wskaźnika jakości toru J .

Współczynnik dynamiczny

Współczynnik dynamiczny, zależny tylko od prędkości pojazdów V [km/h], opisany jest wielomianem trzeciego stopnia w następują-

cej postaci [2]:

$$k_v = 1 + 5 \cdot 10^{-4} \cdot V + 4 \cdot 10^{-5} \cdot V^2 - 1,3 \cdot 10^{-7} \cdot V^3$$

(1)

Przebieg współczynnika ilustruje rys. 1:

Wartość współczynnika dynamicznego nie zależy tylko od prędkości. W znacznym stopniu zależy od konstrukcji i stanu nawierzchni oraz rodzaju i stanu pojazdów szynowych [2]. Zaleca się zatem współczynnik dynamiczny uzależnić od syntetycznego wskaźnika jakości toru J , według wzoru [2]:

$$k_v^J = 1 + \frac{J}{5} \cdot (k_v - 1), \quad (2)$$

gdzie: J – syntetyczny wskaźnik jakości toru. Przyjmując $\zeta = 1,5$ [mm] (dobry stan toru) [2], można zapisać:

$$k_v^J = 1 + \frac{J}{1,5} \cdot (k_v - 1). \quad (3)$$

W celu zapewnienia większej niezawodności eksploatacyjnej toru, wprowadza się parametr t . Zależy on od kategorii linii, dla której wyznaczany jest współczynnik dynamiczny (określany parametrem Ψ). Wartości jakie przyjmuje t przedstawia się następująco [2,20]:

$$\Psi_J = k_v^J \cdot (1 + 0,2 \cdot J \cdot t) \quad (4)$$

$t = 3,00$ dla klasy toru 0, $t = 2,50$ dla klasy toru 1, $t = 2,00$ dla klasy toru 2, $t = 1,50$ dla klasy toru 3, $t = 1,00$ dla klasy toru 4, $t = 0,75$ dla klasy toru 5, gdzie:

k_v^J – współczynnik dynamiczny uwzględniający stan toru oraz prędkość ruchu,
 k_v – współczynnik dynamiczny uwzględniający tylko prędkość ruchu,
 J – syntetyczny wskaźnik jakości,
 t – wartość określająca poziom ufności [2].

Wpływ stanu toru na ugięcia i momenty zginające w podkładzie (przykład obliczeniowy)

W celu przedstawienia wpływu prędkości i stanu toru do obliczeń wybrano podkład betono-

wy typu INBK-7 (rys. 2a). Przyjęto ciężar własny podkładu: $q = 1,0202$ [MN/m]. Podkład w MES [12,23] został podzielony na 80 przekrojów (stąd z uwagi na symetrię obliczono sztywność tylko 41 przekrojów) – rys. 2b. Ze względu na zmienny przekrój poprzeczny analizowanego podkładu (po jego długości), sztywność elementu obliczono jako średnią harmoniczną [7] z następującego wzoru:

$$EI_{(H)} = \frac{2 \cdot E_1 I_1 \cdot E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \quad (5)$$

gdzie $E_1 I_1$ – sztywność elementu na jego początku; $E_2 I_2$ – sztywność elementu na jego końcu. Podkład spoczywa na dwuparametrowym, sprężystym podłożu. Przy obliczaniu nacisku przekazywanego z szyny na podkład założono stałą szerokość podparcia podkładu o podłożu $b = 30$ [cm]. Wpływ dynamicznych oddziaływań uwzględniono przez współczynnik dynamiczny k_v^J (uwzględniający prędkość pociągów i stan toru – parametr J).

Ponadto przyjęto: szyna **UIC60**, rozstaw podkładów $a = 60$ [cm]; masa podkładu = 250 [kg]; współczynnik podłoża $C = 80$ [MN/m³]; obciążenie o nacisku na oś 188,33 [kN]. Wykorzystano charakterystyki geometryczne szyny i podkładu zawarte w [10,14]. Siła ściskająca podkład (na podstawie pracy [3]) $N = -0,309$ [MN] [4]. Obliczona długość zastępcza belki wynosi: $L = 0,96$ [m].

Syntetyczny wskaźnik jakości J przyjmuje następujące wartości dla poszczególnych dopuszczalnych prędkości na linii oraz współczynnik dynamiczny:

$$V=160 \text{ [km/h]} \rightarrow J_{dop} = 2,1 \text{ [mm]}$$

$$k_v^J = 1,825 \text{ [–]}$$

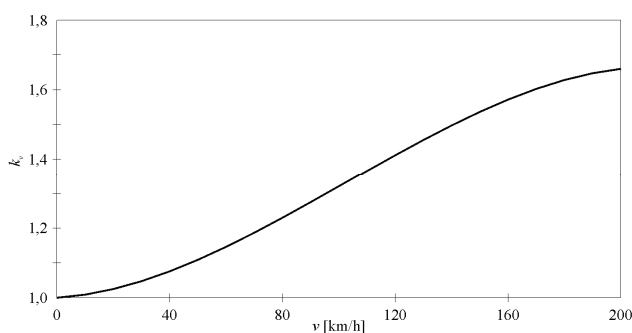
$$V=100 \text{ [km/h]} \rightarrow J_{dop} = 4,3 \text{ [mm]}$$

$$k_v^J = 2,419 \text{ [–]}$$

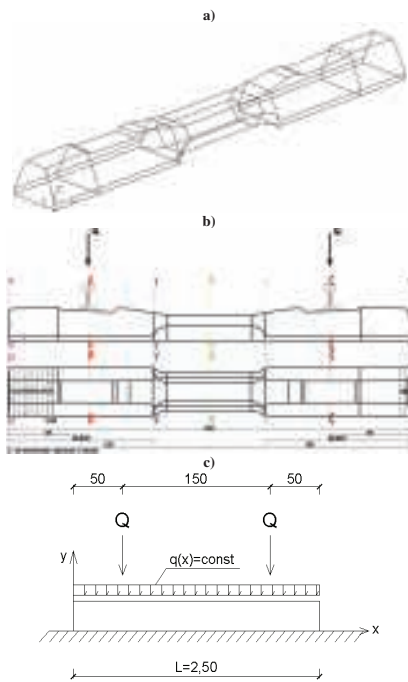
$$V=40 \text{ [km/h]} \rightarrow J_{dop} = 9,6 \text{ [mm]}$$

$$k_v^J = 3,582 \text{ [–]} \quad (6)$$

W tabl. 1 i 2 pokazano przykładowe obliczenia wpływu sztywności oraz zmienności przekroju na ugięcie oraz moment zginający w analizo-



1. Wykres zależności współczynnika dynamicznego od prędkości



2. Model podkładu INBK-7

a) - podział na elementy; b) - wybrane charakterystyczne przekroje;
c) - schemat obciążenia podkładu INBK-7

wanym podkładzie (dla stałej wartości k_1 , k_2 [6], N oraz Q dla $V=100$ [km/h]). Celem porównania przeanalizowano podkład o stałej sztywności (tab. 1 i 2, rys. 3).

Jak widać z wykresów na rys. 3, dwukrotne „przesztywnienie” podkładu, nie skutkuje „ewentualnymi oczekiwanymi efektami”. Ze względu na zwiększającą się sztywność podkładu, wzrasta moment zginający (szczególnie w środku podkładu). Stała wartość sztywności powoduje także niekorzystną pracę na jego środku. Natomiast podkład o najmniejszej przyjętej sztywności (wykazujący zatem cechy „teoretycznego” podkładu drewnianego), uzyskuje najmniejsze wartości momentu w przekroju δ (czyli właśnie na środku podkładu).

Czynniki technologiczne wpływające na pracę podkładu

Doświadczenie wielu zarządów kolejowych wskazuje, że technologia wykonania podkładu strunobetonowego, metody jego zbrojenia i

Tab. 1. Wartości ugięcia w wybranych przekrojach dla zmiennej sztywności El

$k_1 = 24$ [MPa]; $k_2 = 1,2$ [MN]; $N = -0,309$ [MN]	ugięcie [mm]			
$V = 100$ km/h; $J = 4,3$ mm -- $Q = 75$ [kN]	przekrój α	przekrój β pod szyną	przekrój γ	przekrój δ środek podkładu
El (zmienne po długości)	2,886	2,668	2,334	2,178
El (zmienne po długości) x 2	2,777	2,614	2,409	2,317
$El = 3,82$ [MNm ²]	2,748	2,646	2,392	2,286
$El = 7,64$ [MNm ²]	2,680	2,598	2,451	2,392
$El = 0,698$ [MNm ²]	2,702	2,961	2,186	1,817

Tab. 2. Wartości momentów zginających w wybranych przekrojach dla zmiennej sztywności El

$k_1 = 24$ [MPa]; $k_2 = 1,2$ [MN]; $N = -0,309$ [MN]	ugięcie [mm]			
$V = 100$ km/h; $J = 4,3$ mm -- $Q = 75$ [kN]	przekrój α	przekrój β pod szyną	przekrój γ	przekrój δ środek podkładu
El (zmienne po długości)	0	8,516	-3,311	-6,249
El (zmienne po długości) x 2	0	8,186	-4,197	-7,369
$El = 3,82$ [MNm ²]	0	8,137	-4,118	-7,238
$El = 7,64$ [MNm ²]	0	7,918	-4,771	-8,068
$El = 0,698$ [MNm ²]	0	8,227	-2,313	-4,614

kotwienia, skład i proces dojrzewania mieszanki użytej do jego produkcji w sposób istotny przekładają się przede wszystkim na: jakość pracy podkładu, koszty jego produkcji i eksploatacji oraz zdolność do przenoszenia co raz większych obciążeń, przy zachowaniu tych samych wymiarów i zbliżonej masy [15,18].

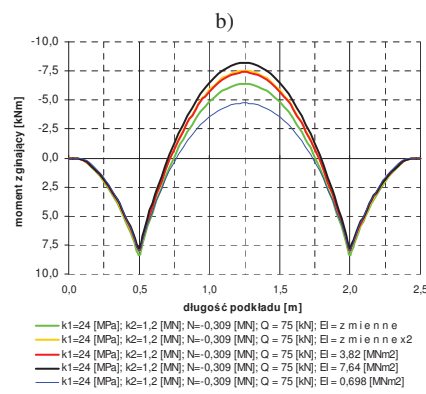
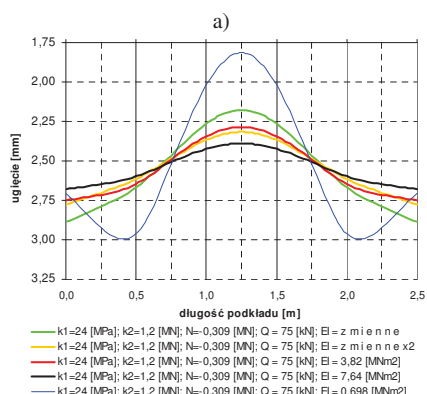
Na podstawie analiz wad podkładów przeprowadzonych przez największych zarządców europejskich sieci kolejowych stwierdzono, że na podkładach wykonywanych w technologii kotwienia poprzez przyczepność, znacznie częściej powstają rysy wzdłużne. Przy kotwieniu mechanicznym (rys. 4) podkładów, tarcze oporowe spełniają funkcję zbrojenia poprzecznego, zapobiegając powstawaniu rys wzdłużnych. Zarządy linii kolejowych w krajach takich jak: Chorwacja, Francja, Polska i Włochy, w których stosowano tylko podkłady zbrojone z wykorzystaniem tarcz oporowych nie sygnalizowały powstawania masowych uszkodzeń podkładów [15].

W przeciwieństwie do eksploatacji, technologia wytwarzania podkładów zazwyczaj powoduje dużo mniejsze ryzyko wystąpienia czynnika losowego, który mógłby doprowadzić do stanu awaryjnego. Znajomość warunków w jakich dany element-podkład będzie

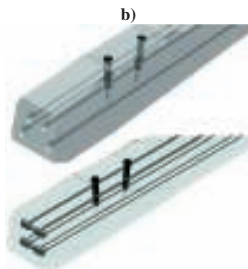
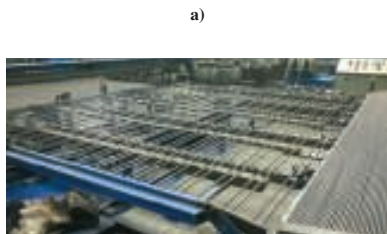
eksploatowany (np. kategorię linii czy rodzaj użytkowanego taboru) można odpowiednio wykorzystać przy projektowaniu określonego typu podkładu, aby spełniał postawione oczekiwania i wymagania.

Wpływ składu betonu na jego trwałość – działanie alkaliów

W ubiegłym wieku występowanie związków alkalicznych w betonie nie było zagadnieniem, którym zajmowały się na szeroką skalę instytucje związane z projektowaniem i wytwarzaniem podkładów betonowych [15,24]. Rezultatem tego były mało restrykcyjne wymagania dotyczące składu cementu używanego do produkcji mieszanki betonowej. W latach 2000 – 2010 na niemieckich liniach kolejowych stwierdzono, że na około 20% podkładów strunobetonowych zabudowanych w latach 90-tych pojawiły się rysy spowodowane uszkodzami alkalicznymi. W 2010 roku wyceniono na ponad miliard euro straty spowodowane zastosowaniem nieprawidłowej technologii i nieodpowiedniego składu cementu podczas produkcji podkładów. Jako główną przyczynę zaistniałej sytuacji wymieniono przede wszystkim zastosowanie zbyt aktywnego alkalicznie kruszywa, które w połączeniu z alkalią doprowadziło do zwiększenia objętości betonu do tego stopnia, że wiele podkładów podczas eksploatacji uległo zarysowaniu (rys. 5) [15]. W konsekwencji powstałych problemów z podkładami, niemieckie koleje (DB), bardzo zaostrzyły od 2012 roku wymagania dotyczące składu mieszanki i wytwarzania podkładów strunobetonowych. W polskich normach uwzględniono zmiany dokonane w przepisach niemieckich. Zgodnie z aktualnymi wymaganiami dotyczącymi składu mieszanki betonowej [15,24], zawartość alkaliów w cementie przeznaczonym do produkcji podkładów strunobetonowych może wynosić maksymalnie 0,6% masy cementu.



3. Wpływ sztywności oraz zmienności przekroju podkładu na osiadanie (a) i na moment zginający (b)



4. a) Zbrojenie stosowane w podkładach strunobetonowych [21]

b) podkład z kotwieniem poprzez przyczepność oraz z kotwieniem poprzez mechaniczne tarcze oporowe [15]

5. Uszkodzenie podkładu wskutek działania alkaliów [15]

Szkodliwe działanie alkaliów

W pracy [15,24] opisano korozję wewnętrzną podkładów betonowych spowodowaną działaniem alkaliów oraz powstawaniem dwóch minerałów: etryngitu i taumazytu. Beton w podkładzie może być narażony na dwa rodzaje korozji:

- zewnętrzną
- wewnętrzną.

Nasypy kolejowe zwykle polepszają warunki w zakresie środowiska otaczającego podkłady i nie pozwalają na dostęp do nich wód gruntowych, dlatego możliwość wystąpienia zewnętrznej korozji podkładów betonowych, spowodowanej roztworami agresywnymi, jest raczej ograniczona [24]. Natomiast w zakresie korozji wewnętrznej najwięcej uwagi poświęca się reakcji kruszywa z alkaliom. Jak wspomniano, reakcje alkaliów z aktywną krzemionką zaczęto wnikliwie badać dopiero na początku XXI wieku, głównie wskutek spowodowanych przez nie uszkodzeń podkładów. Głównym powodem był brak wystarczającej wiedzy na temat oddziaływania na siebie różnych związków chemicznych i minerałów znajdujących się w mieszance betonowej używanej do wytwarzania podkładów strunobetonowych.

Alkalia to mocne zasady nieorganiczne. Łączna zawartość alkaliów w cemencie liczona jest w procentach masy, a wyrażona jako suma tlenku sodu (Na_2O) i potasu (K_2O) - obydwie substancje wykazują podobną reaktywność [15,24]. Jeśli do produkcji mieszanki betonowej zastosuje się kruszywo zawierające w swoim składzie aktywną krzemionkę to pomiędzy ziarnami kruszywa (SiO_2), a występującymi w betonie wodorotlenkami sodu i potasu dojdzie do reakcji chemicznej. Jej charakter jest ekspansywny – powoduje pęcznienie kruszywa w środowisku zasadowym, co może prowadzić do powstawania widocznych rys w strukturze betonu. W pracy [24] stwierdzono, że w normalnym przypadku cement jest głównym dostawcą związków alkalicznych do mieszanki betonowej. Szkodliwe reakcje w betonie o dużej zawartości kruszywa reaktywnych, zachodzą tylko wtedy, gdy przekroczona zostanie dopuszczalna zawartość alkaliów w stosowanym cemencie. Według pracy [15], cement o zredukowanej do najwyżej 0,6% sumarycznej zawartości sodu i potasu, przeliczonej na Na_2O stosuje się, aby uniknąć szkodliwej reakcji alkaliów z krzemionką w kruszywach.

Szkody wywołane występowaniem ettringitu w betonie

Ettringit jest minerałem siarczanowym, powstającym w procesie uwadniania glinianu w obecności siarczanu wapnia [24]. Poprawnie przeprowadzona obróbka cieplna gwarantuje, że wszystkie siarczany, będące w niewielkich ilościach naturalnym składnikiem betonu, przekształcą się chemicznie w ettringit, zanim beton osiągnie wysoką wytrzymałość. Zbyt krótki czas dojrzewania powoduje adsorpcyjne wiązanie się siarczanu z wodzianem krzemianu wapnia. Tak związany siarczan może w każdej chwili, przy sprzyjających warunkach, uaktywnić się i zacząć przekształcać się właśnie w ettringit. Reakcja powstawania etryngitu jest bardzo ekspansywna i w przypadku bardzo gęstej i trwałej struktury, jaką jest dojrzwały beton, prowadzi do powstawania spękań w jego strukturze. Efektem tego jest konieczność wymiany każdego podkładu, w którym doszło do przekształcenia siarczanu w ettringit po okresie uzyskania przez beton pełnej wytrzymałości.

W celu zminimalizowania ryzyka powstawania opóźnionego ettringitu przed rozpoczęciem procesu naparzania podkładu, beton musi odpowiednio długo leżakować w formie. Należy również przestrzegać, żeby temperatura mieszanki nie przekraczała maksymalnych dopuszczalnych wartości: w czasie wstępnego leżakowania temperatury podanej w normie [13], natomiast podczas naparzania 60 [°C].

Szkody spowodowane występowaniem w betonie taumazytu

Taumazyt, podobnie jak ettringit jest występującym w przyrodzie minerałem. W betonie powstaje wskutek reakcji chemicznych przebiegających pomiędzy: węglanami, kwasem krzemowym, siarczanami oraz wodą. Na podstawie badań stwierdzono, że reakcja dwutlenku węgla (zawartego w powietrzu) z wodorotlenkiem wapnia (występującym w betonie) prowadzi do obniżenia pH, czego efektem jest zmniejszenie odporności stali na korozję. Dodatkowym produktem tej reakcji jest kwas krzemowy. W sprzyjających warunkach – temperaturze poniżej 10 [°C], w obecności dużej ilości CO_2 , wapnia i wody, produkty karbonatyzacji mogą przekształcić się w taumazyt. Konsekwencją tego jest spadek wytrzymałości konstrukcyjnej podkładu. Zapobieganie po-

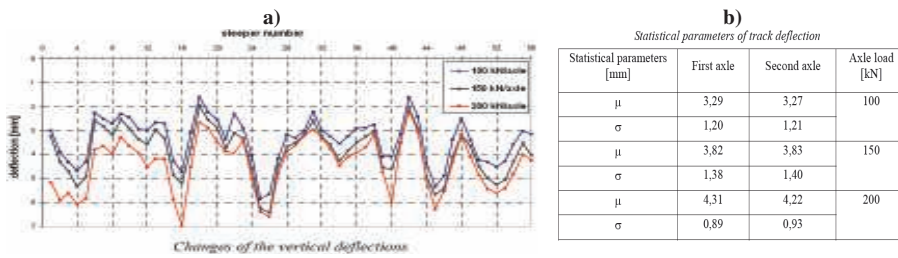
wstawianiu taumazytu polega głównie na ścisłym przestrzeganiu warunków pielęgnacji betonu, szczególnie w miesiącach zimowych. Nie należy również dopuszczać do przypadków, w której podczas produkcji podkładów występują spadki temperatury wyższe niż 20 [°C] [24].

Wpływ utrzymania na eksploatację toru kolejowego

W pracy [11] przedstawiono wykonane pomiary, obrazujące rezultaty pionowych ugięć podczas przejazdu wagonów po torze w złym stanie utrzymania. Badanie oparto na pomiarze wartości ugięć pionowych toru podczas wielokrotnych przejazdów składu kolejowego. Osie wagonów wywierały naciski kolejno: 100, 150 i 200 kN, w zależności od stopnia wypełnienia testowych wagonów. Przejazd taboru został zarejestrowany za pomocą dwóch kamer szybkoobrotowych o dużej rozdzielczości, zamocowanych po obu stronach badanego toru. Odształcenia toru mierzono na długości 66,6 m, na której zabudowanych było 111 podkładów, z czego 56 podlegało ocenie. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 6:

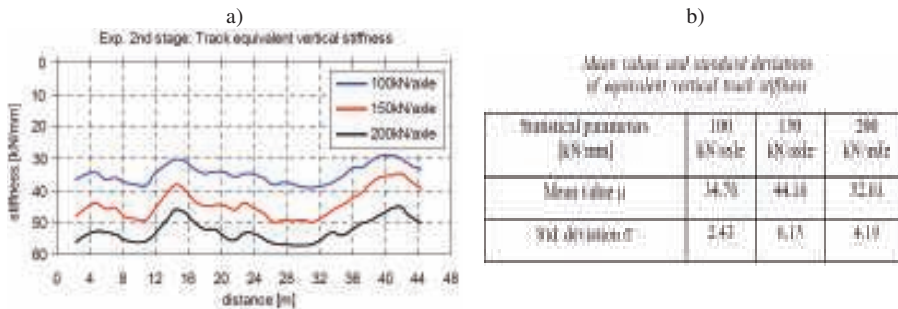
Na wykresie wyraźnie widać, że wartości ugięć na długości badanego odcinka są mocno zróżnicowane – od 2 do aż 7 [mm] (zły stan toru, brak odpowiedniego podparcia niektórych podkładów – luki pod podkładami). Postępująca degradacja nawierzchni prowadzi zatem do nadmiernych ugięć i naprężeń we współpracujących ze sobą elementach nawierzchni kolejowej. Uzyskane wyniki przekładają się na zmianę, tzw. ekwiwalentnej pionowej sztywności toru kolejowego (rys. 7):

Jak widać na rys. 7, w zależności od nacisku na oś zmniejsza się wartość współczynnika pionowej sztywności toru kolejowego. Na podstawie uzyskanych wartości, stwierdzono w pracy [11], że użycie średniej wartości współczynnika sztywności nie jest odpowiednie dla toru w złym stanie utrzymania (ze względu właśnie na duże różnice pomiędzy minimalnymi a maksymalnymi wartościami tego współczynnika). Jak stwierdzają Autorzy w tej pracy [11] zmiany wartości nacisku na oś testowego taboru, w przypadku dobrze utrzymanego toru, nie powodowałyby aż tak dużych zmian w sztywności badanej nawierzchni.

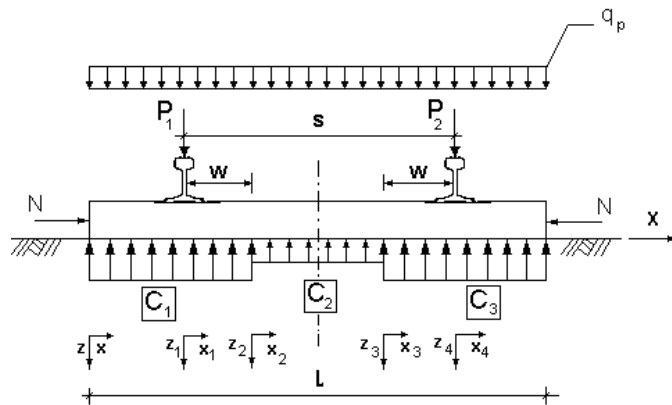


6. Ugięcia toru pod wpływem sukcesywnej zmiany obciążenia [11]

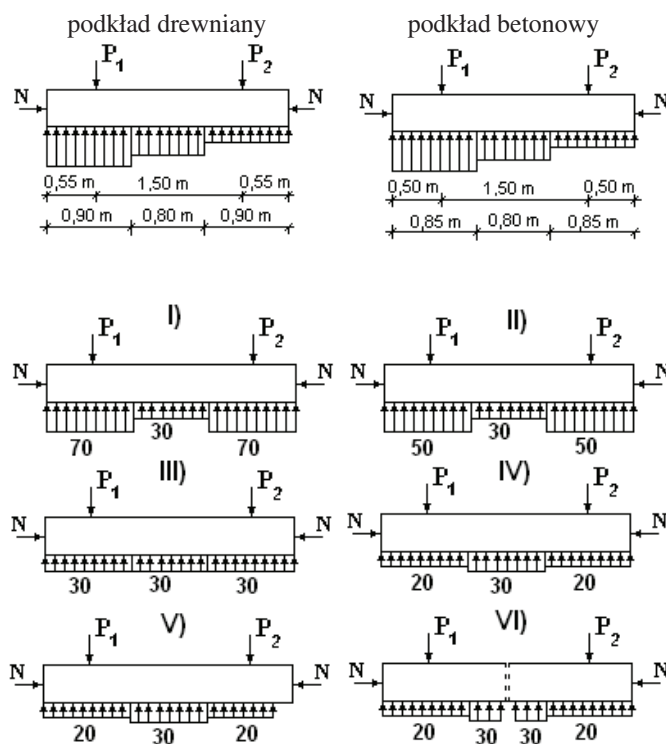
a) wyniki ugięć podkładów po długości toru; b) wartości statystyczne uzyskanych pomiarów ugięć



7. Zmiany ekwiwalentnej sztywności toru (a) i uzyskane wartości (b) [11]



8. Ogólny schemat zmiennego podparcia podkładu (podkład ze zmiennym podparciem po długości) [4]



9. Schematy podparcia i obciążenia

Analiza wpływu podłoża i sposobu podparcia na pracę podkładu kolejowego

Podczas eksploatacji dochodzi do zmiany współpracy podkładu kolejowego z podłożem podsypkowym (np. wskutek zmian jego podparcia po jego długości) [16,22]. W analizie przyjmuje się zmienny rozkład podparcia podłoża podsypkowego, określony współczynnikiem (Ci) czy ki [1] oraz zmienne siły przekazywane z szyny na podkład Pi (co pokazano na rys. 8) [4]:

W szczególności rozważano następujące schematy podparcia i obciążenia (pokazane na rys. 9):

- I – zagęszczona strefa podszynowa,
- II – mniejsze zagęszczenia strefy podszynowej w stosunku do schematu I,
- III – stałe podparcie po długości podkładu,
- IV – zagęszczona strefa w środku podkładu,
- V – zagęszczona strefa w środku podkładu bez podparcia na końcu podkładu,
- VI – podkład pęknięty.

Uzyskano następujące wartości momentów zginających w podkładzie (rys. 10 i 11).

Na podkład betonowy jest przekazywana znacznie większa siła dynamiczna niż na podkład drewniany (spowodowana długością zastępczą toru). Dla rozpatrywanych w pracy schematów podparcia i obciążenia, w przypadku **podkładu drewnianego** przy $P_1=P_2=48$ [kN], mamy maksymalny w środku moment zginający $M=-7,982$ [kNm] dla schematu podparcia V. Dla schematu VI w strefie podszynowej $M=7,379$ [kNm]. Natomiast w przypadku **podkładu betonowego** przy obciążeniu symetrycznym: $P_1=P_2=58$ [kN] mamy maksymalny w środku moment zginający $M=-14,116$ [kNm] dla schematu podparcia V. Dla schematu VI w strefie podszynowej $M=8,486$ [kNm].

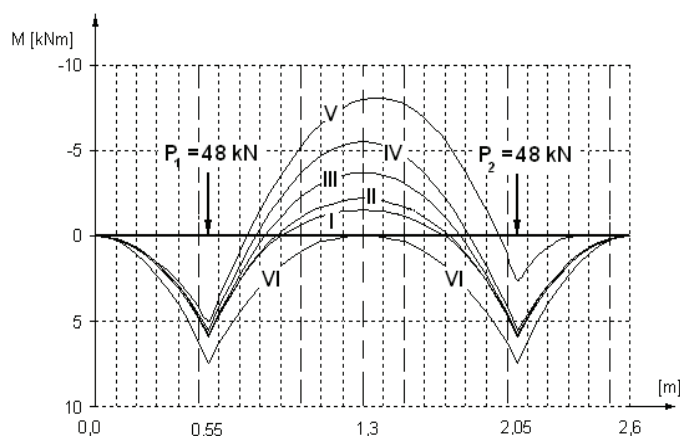
Wynika z tego wniosek, że przy rozluźnieniu zagęszczenia strefy podszynowej podkładu drewnianego i betonowego, nieznacznie maleje moment zginający w tej strefie, ale wzrasta szybko moment zginający na środku podkładu (około 2 razy większy dla podkładu betonowego). W przypadku pękniętego podkładu mamy bardzo duży moment zginający w strefie podszynowej. Znacznie lepiej pracuje podkład drewniany niż podkład betonowy na podłożu podsypkowym przy rozluźniającej się strefie podszynowej podczas jego eksploatacji. Zatem podkład betonowy znacznie bardziej niż podkład drewniany wymaga prawidłowego zagęszczenia jego podłoża, szczególnie w strefie podszynowej.

Wnioski końcowe

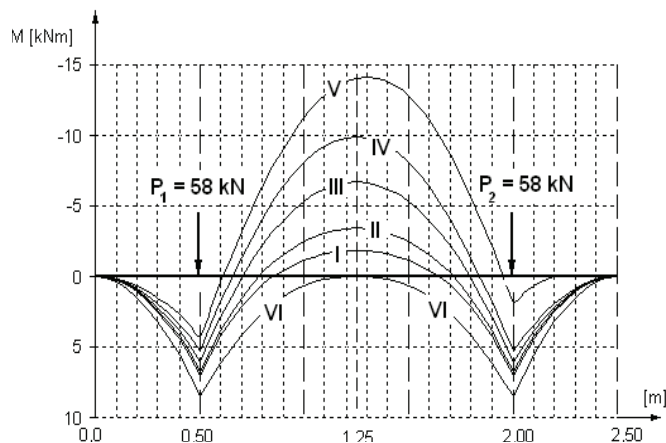
Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że:

Przedstawiona analiza pokazuje prawidłowy sposób kształtowania zagęszczania podsypki tłuczniowej pod podkładami w czasie eksploatacji toru kolejowego.

Odmienny charakter pracy podkładu drewnianego i betonowego w tych samych warunkach podparcia i obciążenia wskazuje, że pod-



10. Wykresy momentów zginających dla modelu podkładu drewnianego o stałej sztywności przy różnych schematach podparcia i przekazywanego obciążenia symetrycznego



11. Wykresy momentów zginających dla modelu podkładu betonowego o stałej sztywności przy różnych schematach podparcia i przekazywanego obciążenia symetrycznego

kład drewniany wykazuje większą elastyczność w różnych warunkach podparcia (może być zatem stosowany nawet w miejscach gdzie podtorze wykazuje tendencje do trwałych odkształceń), a podkład betonowy wymaga dobrego i równomiernego zagęszczenia podsypki, szczególnie w strefie podszynowej.

Najbardziej niekorzystny schemat podparcia V - (szczególnie dla podkładu betonowego), czyli zagęszczenie w strefie środkowej, przy jednoczesnym rozluźnieniu podłoża w strefach podszynowych. Bardzo niekorzystny jest także schemat podparcia VI, gdzie powstaje wtedy znaczny moment zginający w przekroju podszynowym.

Dla przypadku obciążenia i podparcia V dla podkładu betonowego mamy moment w środku podkładu około czterokrotnie większy od momentu pod szyną. W przypadku podkładu drewnianego natomiast momenty zginające niewiele się różnią co do wartości.

Postępująca degradacja nawierzchni kolejowej powoduje przekazywanie zwiększonych oddziaływań z szyny na podkład kolejowy. Nieprawidłowe podparcie podkładu (np. brak jego kontaktu z podłożem w stanie nieobciążonym) powoduje duże ugięcia podkładów kolejowych. „Przesztywnianie” podkładu nie przynosi spodziewanych efektów (mniejsze ugięcia czy momenty zginające). Analiza sztywności pokazuje również, że podkład o zmiennej i mniejszej sztywności niż podkład o dużej i stałej sztywności, znacznie łatwiej przejmuje obciążenia przekazywane z szyny. Za taki podkład można uznać „teoretyczny podkład drewniany”, który znacznie lepiej pracuje w warunkach, gdy podłoże ma tendencję do odkształceń. Uzasadnione jest zatem poszukiwanie rozwiązań prawidłowej pracy podkładu poprzez m.in. odpowiedni kształt, kotwienie podkładu czy właściwe jego podparcie.

Zwrócono również uwagę na trwałość betonu pod wpływem alkaliów, skutkujące np. niepożądanym zarysowaniem podkładów podczas ich eksploatacji. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Bałuch H.: Sposoby wyznaczania charakterystyk podłoża kolejowego. Problemy Kolejnictwa z. 39, Warszawa, WKiŁ 1967,
- [2] Bałuch M.: Ustalanie dopuszczalnych nacisków osi i maksymalnych prędkości na liniach PKP. Prace Centrum Naukowo-Technicznego Kolejnictwa, zeszyt nr 139, Warszawa 2003,
- [3] Basiewicz T.: Tor kolejowy na podkładach betonowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1963,
- [4] Bednarek Wł.: Analiza wpływu podłoża i sposobu podparcia na pracę podkładu kolejowego. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej (Archives of Institute of Civil Engineering), Poznań University of Technology, 9/2011,
- [5] Bednarek Wł.: Influence analysis of variable roadbed stiffness and support of railway sleeper on its work. Foundations of Civil and Environmental Engineering, Poznań University of Technology, 2010, (w druku),
- [6] Bednarek Wł.: Determination of foundation coefficients for a 2-parameter model on the basis of railway sleeper deflection. International Conference of Continuous Media with Microstructure II, Łagów, 2015,
- [7] Buczkowski W.: Rozwiązywanie belek o zmiennej sztywności metodą różnic skończonych. Architectura, 8 (3-4), 2009,
- [8] Czyżuła W.: Możliwości przyspieszenia stabilizacji podsypki. Drogi Kolejowe, nr 8, 1989,
- [9] Czyżuła W.: Eksploatacyjna stabilność drogi kolejowej. Monografie Politechniki Krakowskiej, nr 126, Kraków 1992,
- [10] Czyżuła W., Towpik K.: Problemy modelowania oraz identyfikacji modeli toru bezstykowego. Problemy kolejnictwa, zeszyt 128, Warszawa 1998,
- [11] Drozdziel J., Sowiński B., Szulczyk A.: Equivalent track stiffness determination. International Virtual Journal for Science, Techniques and Innovations for Industry, 2011,
- [12] Eisenberger M., Yankelevsky D. Z.: Exact stiffness matrix for beams on elastic foundation. Computers&Structures, Vol. 21, No. 6, 1985,
- [13] EN 13230-1: Podkłady i podrozdzielnice betonowe,
- [14] Id-1 (D1): Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych, Warszawa 2005,
- [15] Kisilowski J., Kurdowski W.: Solidność elementem bezpieczeństwa systemu. Rynek Kolejowy, nr 5/2014,
- [16] Krocak St., Mazur St., Dudek Z.: Teoretyczna analiza wpływu zmiennej sztywności i sposobu podparcia podkładu kolejowego na jego pracę. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Drogi Kolejowe'93, Logistyka, 3/2014,
- [17] Lewandowski K.: Ekonomiczne aspekty zastosowań nowoczesnych przytwierdzeń szyn kolejowych na efektywność funkcjonowania transportu kolejowego. Logistyka, 3/2014,
- [18] Locher F. W.: Zement. Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Düsseldorf 2010,
- [19] Oczykowski A.: Badania i rozwój przytwierdzenia sprężystego SB. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 150,
- [20] Sancewicz S.: Nawierzchnia kolejowa. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2010,
- [21] Sawicki P.: Analiza znaczących czynników wpływających na pracę eksploatowanego betonowego podkładu kolejowego. Praca magisterska, Poznań 2015, (pod kierunkiem Wł. Bednarka)
- [22] Szumierz W.: Wpływ odkształceń podłoża górniczego na pracę podkładu betonowego. Drogi Kolejowe nr 4/91,
- [23] Teodoru I-B., Mușat V.: Beam elements on linear variable two-parameter elastic foundation. Buletinul Institutului Politehnic Din Iași, Tomul LIV (LVIII), Fasc. 2, 2008,
- [24] Titze A.: Szkody wywołane przez alkalia w betonie. Ryzyko, którego można uniknąć. Infrastruktura Transportu, 2/2011,
- [25] Towpik K.: Infrastruktura drogi kolejowej. Obciążenia i trwałość nawierzchni. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Warszawa-Radom 2006,
- [26] Warunki techniczne wykonania i odbioru podkładów i podrozdzielnic strunobetonowych, WTWIO – ILK3a-5187/01/05, PKP PLK S.A., 2005.