

## **Badania obciążonych elementów nawierzchni i podtorza oraz układów torowych wraz z infrastrukturą kolejową**

**Research on loaded elements of superstructure and subgrade and on track layout including railway infrastructure**

### *Streszczenie*

Obiektem badań i analiz realizowanych w Pracowni Dróg Kolejowych Zakładu Budowy Mostów i Dróg Kolejowych są zjawiska zachodzące podczas eksploatacji w nawierzchni kolejowej i podtorzu, aktualnie stosowane konstrukcje w kolejnictwie oraz metody i technologie ich budowy, wzmacniania, napraw oraz utrzymania. Prowadzone są również badania warunków pracy, oceny właściwości i jakości modernizowanego podtorza kolejowego oraz zagadnienia organizacji i regulacji ruchu pociągów oraz tramwajów wraz z optymalnym wykorzystaniem infrastruktury.

### *Abstract*

Research done in Railroads Lab of Bridge and Railway Construction Division focuses on phenomena occurring during exploitation of railroad's superstructure and subgrade, on currently used railroad superstructures, methods and technologies for constructing, strengthening, repair and maintenance of railroads. Research is also done on subgrade's work environment, indication of parameters and modernisation quality evaluation, as well as on optimisation of train and tram traffic quality, organisation and regulation for optimal infrastructure utilisation.

Współczesnym wyzwaniem jest dostosowanie i modernizacja linii kolejowych oraz tras tramwajowych do nowych potrzeb i oczekiwań przez poprawę parametrów eksploatacyjnych, takich jak: zwiększenie prędkości, nacisków osi, bezpieczeństwa oraz płynności ruchu czy zmniejszenie nakładów na utrzymanie linii. Odbywa się to w ramach trwających i planowanych kosztownych inwestycji infrastrukturalnych, ale również niskokosztowych działań organizacyjnych. Obecnie realizowane są prace mające na celu:

- poprawę jakości połączeń międzyregionalnych i metropolitalnych oraz ich integrację z innymi systemami transportu publicznego,
- rozwój transportu intermodalnego,
- rozwój masowych przewozów między kluczowymi ośrodkami gospodarczymi, przejściami granicznymi i portami morskimi.

Planowane jest rozwinięcie lokalnej i regionalnej infrastruktury kolejowej, w tym odbudowa niektórych linii, przewiduje się też rozbudowę sieci kolejowej o ponad 1,6 tys. km nowych linii, w tym również budowę linii dużych prędkości. Realizowana i planowana poprawa stanu infrastruktury kolejowej w Polsce jest znaczącym przedsięwzięciem inwestycyjnym wymagającym dużych środków technicznych i nakładów finansowych. Dla osiągnięcia założonych celów niezbędne jest również wsparcie naukowe realizowanych projektów.

Szczególnego znaczenia nabierają zatem zagadnienia z zakresu:

- optymalizacji układu geometrycznego toru,
- wprowadzania nowych konstrukcji drogi kolejowej,
- osiągnięcia wymaganej dokładności (jakości) robót budowlanych i utrzymaniowych,
- analizy obciążonych elementów nawierzchni i podtorza oraz układów torowych wraz z infrastrukturą kolejową,
- trwałości i wytrzymałości podtorza kolejowego,
- maksymalizacji możliwości wykorzystania infrastruktury przy zastosowaniu metod inżynierii ruchu,
- zwiększania prędkości i płynności ruchu przy jednoczesnym zwiększaniu poziomu bezpieczeństwa i uwzględnieniu potrzeb dostępności, w tym osób niepełnosprawnych.

W Pracowni Dróg Kolejowych Zakładu Budowy Mostów i Dróg Kolejowych realizowane są następujące autorskie badania i analizy:

- analiza wpływu powstających podczas eksploatacji imperfekcji toru bezстыkowego na pracę jego statycznie obciążonych elementów w płaszczyźnie pionowej,
- badania warunków pracy, oceny właściwości i jakości modernizowanego podtorza kolejowego,
- ocena wpływu wykonywania kolejowych robót budowlanych na możliwości sprawnego prowadzenia ruchu pociągów,
- ocena jakości kolejowego transportu dalekobieżnego i aglomeracyjnego oraz jakości ruchu tramwajowego.

Głównym celem badań realizowanych w Pracowni Dróg Kolejowych Zakładu Budowy Mostów i Dróg Kolejowych jest analiza zjawisk zachodzących podczas eksploatacji w nawierzchni kolejowej i podtorzu oraz aktualnie stosowanych w kolejnictwie konstrukcji, metod i technologii budowy, wzmocnienia, napraw i utrzymania, a także poszukiwanie nowych rozwiązań mogących zapewnić drogom kolejowym niezawodność, dostępność, łatwość utrzymania, bezpieczeństwo i komfort podróży. Badania obejmują również zagadnienia optymalizacji organizacji i regulacji ruchu pociągów oraz tramwajów, w tym właściwego wykorzystania istniejącej i planowanej infrastruktury.

Badania te mają swoje odzwierciedlenie w praktyce, ich rezultaty były wykorzystywane między innymi przy modernizacji kluczowych linii kolejowych, w diagnostyce, przy kształtowaniu systemu kolei metropolitalnej czy przyspieszeniu ruchu tramwajów. Efektem prac są również propozycje zmian przepisów prawnych, z których część została wdrożona.

## **1. Wpływ pionowych odkształceń nawierzchni i podtorza na pracę bezстыkowego toru kolejowego**

### **1.1. Wprowadzenie**

Stan toru kolejowego oraz jego ukształtowanie i położenie, opisywane za pomocą parametrów geometrycznych, ulegają stopniowej zmianie podczas eksploatacji. Zmiany geometrycznego położenia toru następują głównie wskutek obciążeń od pojazdów, zmian jego podparcia oraz robót wykonywanych w torze (podbijanie toru, oczyszczanie podsypki). Wskutek formującej się nierówności czynniki te są powodem powstawania różnej postaci kontaktu podkładu z warstwą podsypki. Sztywność toru w stanie nieobciążonym (bez nacisków od pojazdów) powoduje, że podkłady w różnym stopniu opierają się na podsypce. W najbardziej niekorzystnym przypadku może wystąpić zupełny brak kontaktu podkładu z podsypką. W torze nieobciążonym trudno ocenić skutki takich miejscowych nierówności dla pracy toru kolejowego w płaszczyźnie pionowej. Zmieniający się sposób podparcia toru można opisać dopiero w torze obciążonym po przyłożeniu nacisku (pochodzącego np. od osi lokomotywy). Analiza przekazywania nacisku z koła przez szynę na podkład kolejowy pozwala unaocznić skutki takiej nierówności dla toru kolejowego. Omawiane nierówności, powstające w czasie eksploatacji toru, mają charakter losowy i niezamierzony.

Przedmiotem autorskich analiz są zagadnienia związane z wpływem wywoływanych zamierzonych odkształceń na pracę statycznie obciążonych elementów kolejowego toru bezстыkowego w płaszczyźnie pionowej. Poddano analizie teoretyczno-doświadczalnej zamierzoną nierówność w bezстыkowym torze kolejowym w postaci jego podnoszenia i generowanych krótkich nierówności w podparciu bezстыkowego toru kolejowego.

### **1.2. Podnoszenie bezстыkowego toru kolejowego**

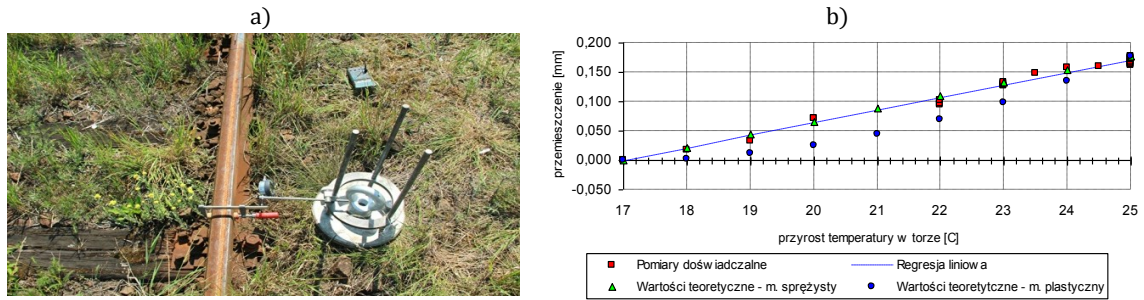
Odształceniem zamierzonym zaburzającym zachowanie toru jest podnoszenie toru kolejowego przez wywieranie nacisku pionową siłą skupioną. Analogiczne odkształcenie powstaje między innymi podczas pracy maszyn torowych (na przykład podbijarek) lub podczas badań podtorza płytą VSS.

#### **1.2.1. Opis przeprowadzonego doświadczalnego podnoszenia toru kolejowego**

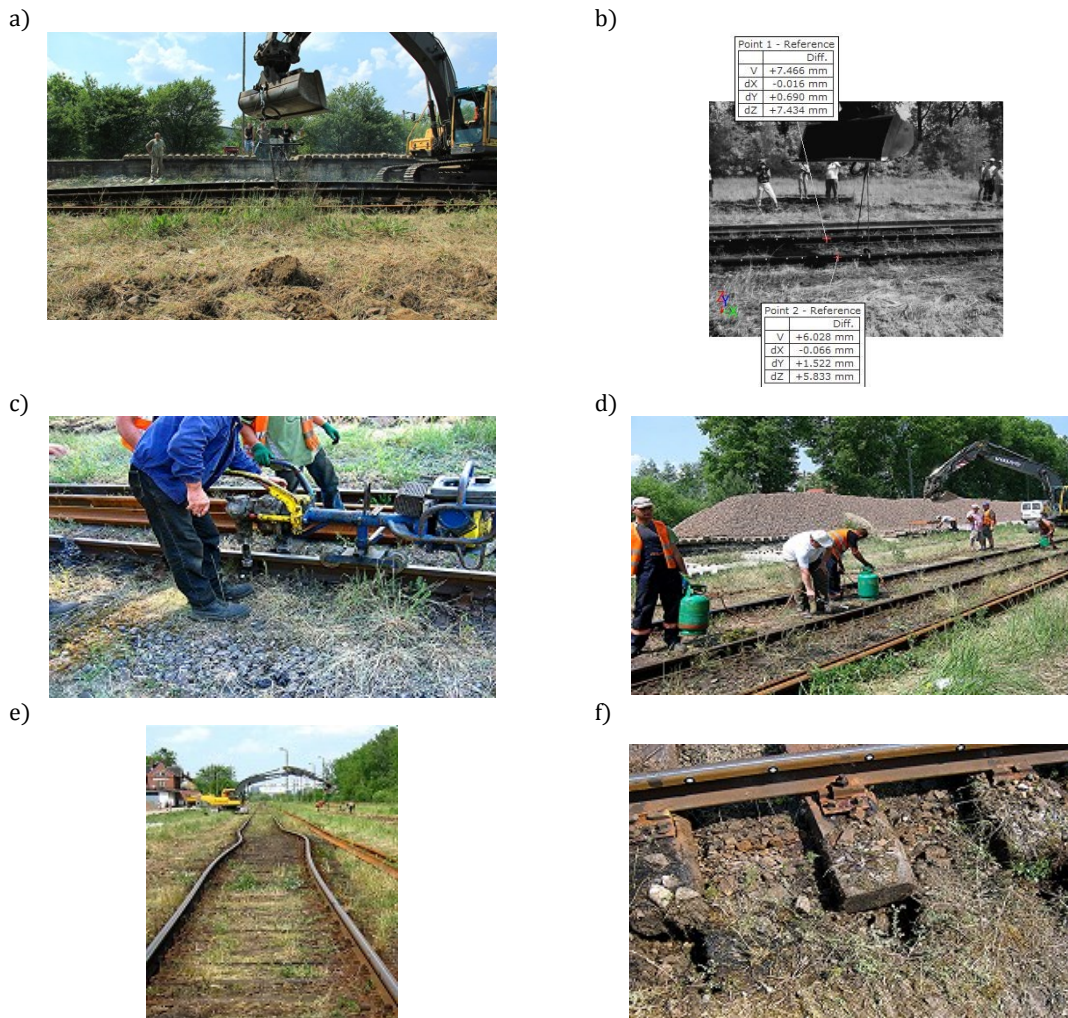
Na stacji kolejowej Bolechowo, położonej na linii 356, wykonano autorskie badanie terenowe podnoszenia rzeczywistego toru kolejowego (*full-scale test*). Badanie przeprowadzono na następujących po sobie kolejnych etapach:

- 1) wykonanie regulacji naprężeń w torze dla określenia temperatury neutralnej szyny  $\rightarrow t_n$  (rys. 2c), a następnie rzeczywistej siły termicznej w torze,
- 2) ponowne przytwierdzenie szyn do podkładów,
- 3) podgrzewanie toru palnikami gazowymi (rys. 2d) w celu podwyższenia siły termicznej w torze,
- 4) określenie oporu podłużnego podłoża,
- 5) pomiary aktualnej temperatury szyny  $t$ , siły podnoszącej  $Q$  oraz strzałki podnoszenia  $f$  sukcesywnie w trakcie podnoszenia toru.

Celem określenia parametrów do analizy teoretycznej oporu podłużnego podłoża podsypkowego,  $k_l$  dla modelu sprężystego i  $r_g$  dla modelu plastycznego, pomierzono przemieszczenia podłużne toru (rys. 1). Na rysunku 2 pokazano przebieg kolejnych etapów wykonanego badania podnoszenia toru kolejowego.



Rys. 1. Pomiar przemieszczeń podłużnych bezстыkowego toru kolejowego na stacji Bolechowo: a) stanowisko badawcze (widok z góry), b) wartości doświadczone i teoretyczne przemieszczeń toru (po osi x toru)



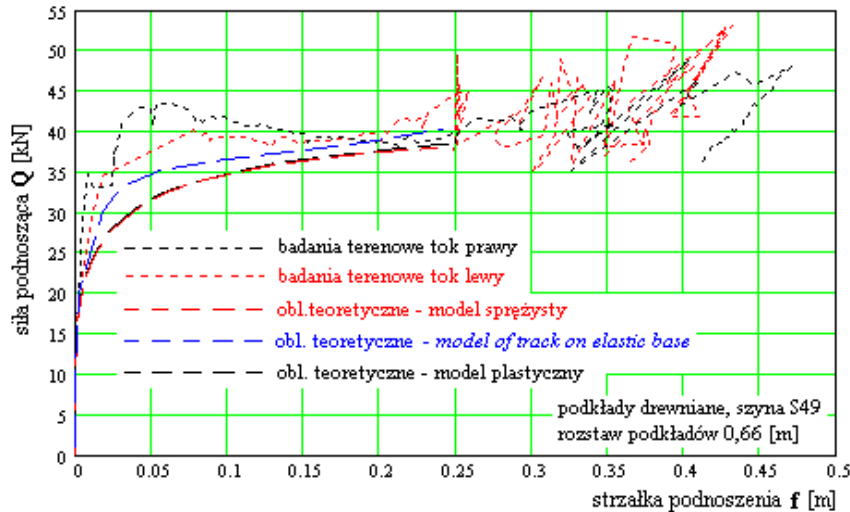
Rys. 2. Przebieg badania terenowego na stacji kolejowej Bolechowo a) podnoszenie toru kolejowego, b) pomiar siły i strzałki podczas badania, c) rozprężanie toru w celu określenia temperatury neutralnej szyn (przed podnoszeniem), d) podgrzewanie toru palnikami, e) tor kolejowy po opuszczeniu na podłoże, f) przemieszczenie poziome toru po opuszczeniu na podłoże

### 1.2.2. Wyniki uzyskane podczas badania terenowego

Na podstawie pomiaru przemieszczeń podłużnych bezстыkowego toru kolejowego (rys. 1) otrzymano dla modelu sprężystego wartość parametru  $k_1 = 47,092$  [MPa], czyli dla oporu podłoża opisanego przez zależność:  $r(u) = k_1 \cdot u$ , a dla modelu plastycznego  $r_g = 0,0153$  [MN/m], czyli dla oporu podłużnego podłoża opisanego zależnością:  $r(u) = r_g$ .

Dla analizowanych modeli podłoża szynowego zależność pomiędzy strzałką podnoszenia a siłą podnoszącą opisano funkcją w postaci:  $Q(f) = u_0 + u_1 \cdot f + u_2 \cdot f^3$ , gdzie:  $Q$  – siła podnosząca;  $u_0, u_1, u_2$  oraz  $u_3$  – stałe otrzymane z wykonanego badania terenowego;  $f$  – strzałka podnoszenia.

Podczas przeprowadzonych badań terenowych uzyskano zależność pomiędzy siłą podnoszącą a strzałką podnoszenia pokazaną na rysunku 3 (osie przyjęte zgodnie z programem PONTOS):



Rys. 3. Zależność pomiędzy strzałką podnoszenia  $f$  a siłą podnoszącą  $Q$  na długości toru (oś z)

$$N = 000 \text{ [MN]}, EI = 308 \text{ [MNm}^2], \eta = 2,39\%, g = 000 \text{ [MN/m]}$$

$$k_1 = 47,09 \text{ [MPa]} \text{ (model sprężysty); } \text{[0,0153]} \text{ [MN/m]}$$

$$r_g = 0,01 \text{ [MN/m]} \text{ (model plastyczny); } \text{[0,0153]} \text{ [MN/m]}$$

(badanie terenowe – szyna prawa),  
(badanie terenowe – szyna lewa),

gdzie:  $N_t$  – aktualna siła termiczna w torze [MN];  $EI$  – sztywność toru [MNm<sup>2</sup>];  $g_t$  – ciężar toru [MN/m]

Przeprowadzone badanie dodatkowo potwierdziło przyjęte założenie, że podnoszenie toru w płaszczyźnie pionowej można opisywać przy sztywnym podłożu w płaszczyźnie pionowej ( $k_3 = \infty$ ).

### 1.3. Autorska metoda symulująca zamierzone odkształcenie w torze

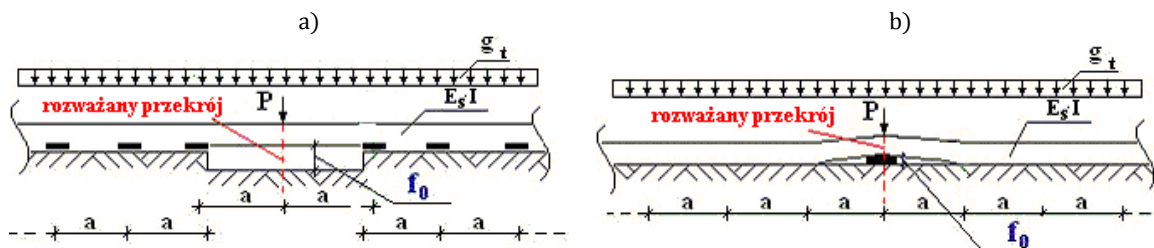
Kolejną autorską analizą jest praca toru w zasięgu miejscowego odkształcenia, co pokazano na rysunku 4. Podano metodę generowania takiego odkształcenia w torze i sposób pomiaru poszczególnych parametrów niezbędnych do opisanego przekazywania siły z koła przez szynę na współpracujący podkład kolejowy. Metoda ta, na podstawie pomiarów w obciążonym torze, umożliwia opisywanie skutków zmiany warunków podparcia toru, wykazując swoją przydatność do analizowania wzrostu ugięć i naprężeń dla założonego kształtu imperfekcji symulujących zwłaszcza krótkie nierówności powstające w eksploatowanym torze kolejowym. Określone zależności pomiędzy powstającymi w torze odkształceniami a zmianami wartości ugięć i naprężeń w szynie oraz podkładzie można ocenić dopiero pod wpływem przyłożonego obciążenia. Opisano wykonane badania doświadczalne w torze kolejowym obejmujące pomiary ugięć, sił i naprężeń w elementach nawierzchni w warunkach symulowanych niejednorodności w podłożu podkładów.



### 1.3.1. Opis autorskiej metody generowania zamierzonego odkształcenia w torze

W celu przeprowadzenia analizy pracy obciążonych elementów toru na lokalnej nierówności wykonano badania terenowe na stacji kolejowej Poznań-Franowo. Celem badań było wywołanie zamierzonego odkształcenia w torze kolejowym przez symulowanie nierówności w podparciu toru w dwóch postaciach (dla rozważanego przekroju – rys. 4):

- 1) obniżenie przekroju poprzecznego w badanym torze kolejowym (rys. 4a),
- 2) podniesienie przekroju poprzecznego w badanym torze kolejowym (rys. 4b).

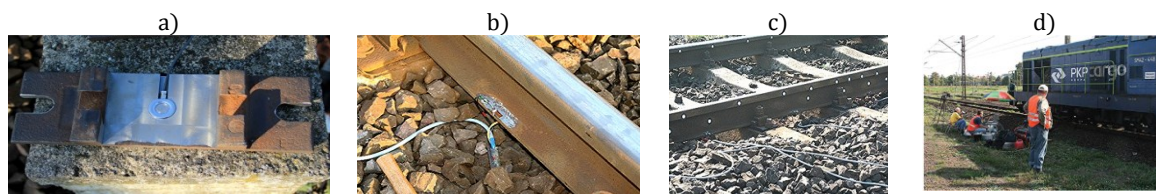


Rys. 4. Schematy nierówności wywołanych w torze kolejowym: a) obniżenie przekroju poprzecznego w torze kolejowym; b) podniesienie przekroju poprzecznego w torze kolejowym, gdzie  $f_0$  – nierówność wywołana w torze kolejowym [mm],  $P$  – przyłożona siła [MN],  $E_s \cdot I$  – sztywność toru w płaszczyźnie pionowej [MNm<sup>2</sup>],  $g_t$  – ciężar toru [MN/m],  $a$  – rozstaw podkładów [m]

W miejscu wywołanego w zamierzony sposób odkształcenia toru kolejowego mierzono między innymi (rys. 5):

- ugięcia szyny pod przejeżdżającym pociągiem,
- naprężenia szyny pod przejeżdżającym pociągiem,
- ugięcia podkładu betonowego na jego końcu,
- siłę przekazywaną z szyny na podkład kolejowy.

Do analizy przemieszczeń wykorzystano optyczny system pomiarowy firmy GOM mbH (Gesellschaft für Optische Messtechnik, Technische Universität, Braunschweig), który ma zastosowanie w digitalizacji 3D. System PONTOS służy do dynamicznej analizy przemieszczeń 3D, zapewnia precyzyjne (z dokładnością do 0,001 mm), bezkontaktowe pomiary pozycji, ruchu i deformacji przy krótkim czasie pomiaru (np. 0,005 s). Skorzystano z programów PONTOS Viewer version v6.3.0-5 by GOM mbH oraz catmanEasy version 2.1 by HBM GmbH.



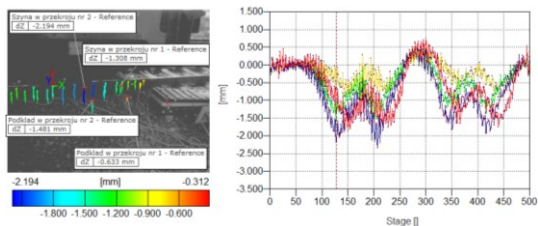
Rys. 5. Badania terenowe na stacji Poznań-Franowo (fot. W. Bednarek); a) czujnik KMR200 HBM umieszczony w podkładce do pomiaru siły przenoszonej z szyny na podkład kolejowy w wyniku niedoskonałości  $f_0$ ; b) tensometr do pomiaru naprężeń w szynie; c) punkty na szynach do pomiarów (system PONTOS); d) stanowisko pomiarowe do precyzyjnej rejestracji pomiarów

### 1.3.2. Wyniki uzyskane podczas badań terenowych dla rozważanego przekroju

Podczas kolejnych przejazdów lokomotywy po odkształconym torze kolejowym (rys. 5d) dokonano pomiarów: ugięć szyny i podkładu, zmian naprężeń w szynie oraz zmian siły bezpośrednio przekazywanej z szyny na podkład dla kolejnych osi lokomotywy SM-42. Jak wyraźnie widać na rysunkach 6-8, wygenerowane strzałki  $f_0$  odkształceń w znaczący sposób powodują zmianę pracy obciążonych elementów torowych w torze. Na zamieszczonych rysunkach (szczególnie 6 i 7) strzałki nierówności  $f_0$  wywołane w torze zmieniają w znaczący sposób pracę obciążonych elementów nawierzchni kolejowej. Zwłaszcza w rozpatrywanym przekroju można zaobserwować duży wpływ tych nierówności na pracę toru kolejowego (rys. 6-7).

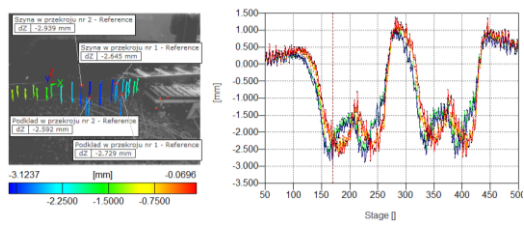
nierówność  $f_0 = 0$  [mm] (stan początkowy)

nierówność  $f_0 = 1$  [mm]



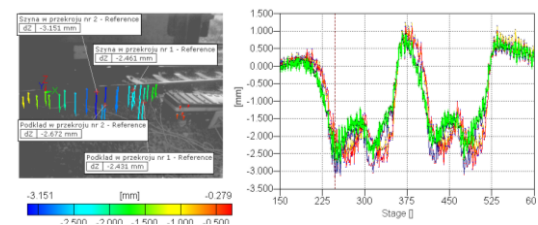
— ugięcie szyny w rozważanym przekroju  
 — ugięcie podkładu w rozważanym przekroju

nierówność  $\delta = 2$  [mm]

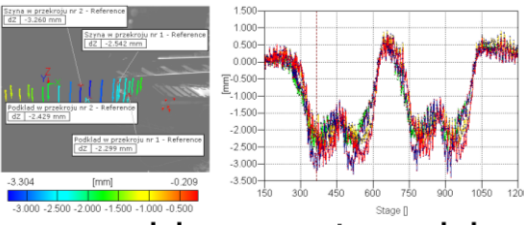


— ugięcie szyny w rozważanym przekroju  
 — ugięcie podkładu w rozważanym przekroju

nierówność  $\delta = 3$  [mm]



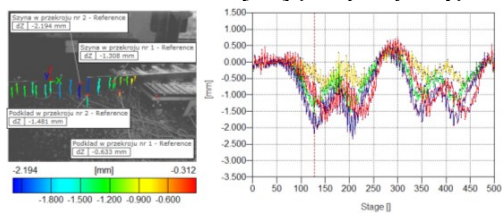
— ugięcie szyny w rozważanym przekroju  
 — ugięcie podkładu w rozważanym przekroju



— ugięcie szyny w rozważanym przekroju  
 — ugięcie podkładu w rozważanym przekroju

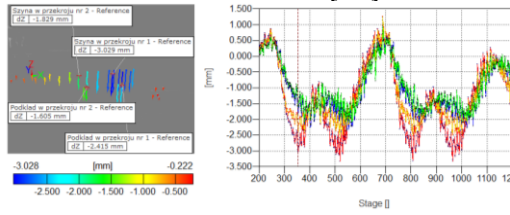
Rys. 6. Uzyskane ugięcia szyny i podkładu wskutek wywołanych nierówności w torze kolejowym podczas obniżania rozważanego przekroju dla schematu z rys. 4a

nierówność  $\delta = 0$  [mm] (stan początkowy)



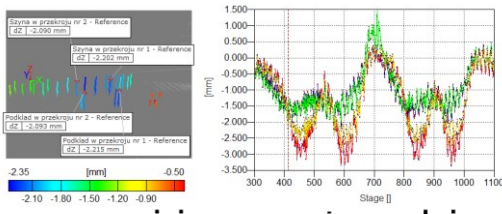
— ugięcie szyny w rozważanym przekroju  
 — ugięcie podkładu w rozważanym przekroju

nierówność  $\delta = 1$  [mm]



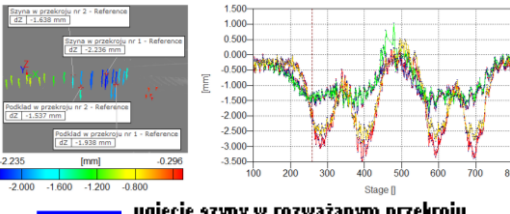
— ugięcie szyny w rozważanym przekroju  
 — ugięcie podkładu w rozważanym przekroju

nierówność  $\delta = 2$  [mm]



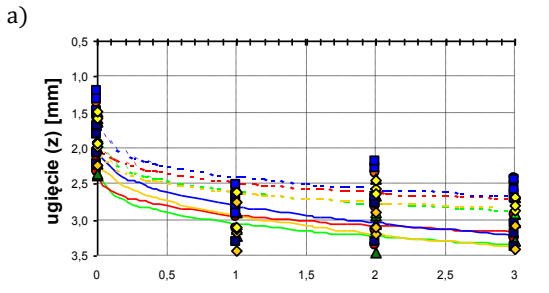
— ugięcie szyny w rozważanym przekroju  
 — ugięcie podkładu w rozważanym przekroju

nierówność  $\delta = 3$  [mm]

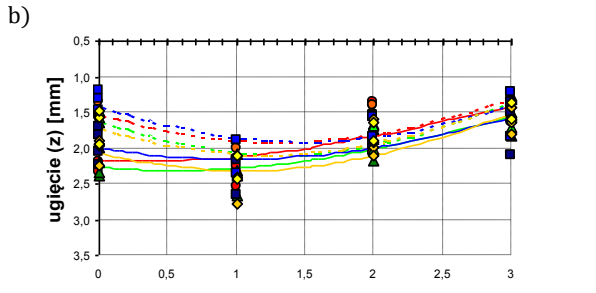


— ugięcie szyny w rozważanym przekroju  
 — ugięcie podkładu w rozważanym przekroju

Rys. 7. Uzyskane ugięcia szyny i podkładu wskutek wywołanych nierówności w torze kolejowym podczas obniżania rozważanego przekroju dla schematu z rys. 4b



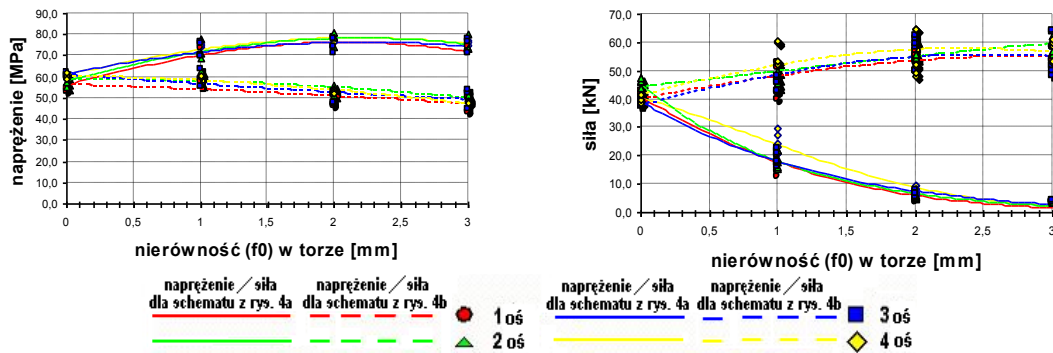
— ugięcie szyny    — ugięcie podkładu    ● 1 oś    ▲ 2 oś



— ugięcie szyny    — ugięcie podkładu    ■ 3 oś    ◆ 4 oś

c)

d)



Rys. 8. Uzyskane wartości wskutek wywoływanych autorskich nierówności w torze kolejowym (dla kolejnych osi lokomotywy SM-42); a) ugięcia szyny i podkładu (schemat z rys. 4a); b) ugięcia szyny i podkładu (schemat z rys. 4b); c) naprężenia w stopce szyny; d) zmiany siły w czujniku umieszczonym w podkładce

- 1) Dla schematu z rysunku 4a, przy braku odkształcenia w torze ( $f_0 = 0$  [mm]), ugięcia szyny wynoszą około 2 [mm] (np. pod 2 osią lokomotywy obciążeniowej otrzymano wartość 1,996 [mm]). Przy  $f_0 = 3$  mm ugięcie szyny wzrasta do wartości 3,537 [mm], czyli o 77,2%, a ugięcie podkładu zwiększa się z 1,437 do 2,873 [mm], czyli aż o 99,89%. Zwiększenie ugięcia szyny i podkładu wyraźnie widać na rysunkach 1.6 i 1.8.
- 2) Dla schematu z rysunku 4b obserwujemy zmniejszenie ugięcia szyny pod osią 2 lokomotywy z 2,269 do 1,553 [mm] zależnie od wartości wywołanego w torze odkształcenia  $f_0$ . Zmniejszenie ugięcia szyny w tym przypadku wynosi 31,55% (w odniesieniu do toru bez wstępnych nierówności). Zmniejsza się również ugięcie podkładu z 1,864 do 1,481 [mm], czyli o 20,56% (w stosunku do toru bez wstępnych nierówności). Zmniejszenie ugięcia szyny i podkładu wyraźnie widać na rysunkach 7 i 8. Opisane zmiany ugięcia prowadzą do wyraźnej zmiany zarówno naprężeń w szynie, jak i wartości siły przekazywanej z szyny na współpracujący podkład kolejowy (rys. 8c i 8d).

Zaproponowana metoda generowania odkształceń w torze kolejowym (pokazana na rys. 4 i 5) pozwala na kreowanie zamierzonej jej postaci o znanych początkowych wartościach długości  $l_0$ , a przede wszystkim żądanej strzałki  $f_0$  nierówności. Jest to nieniszcząca metoda wywoływania odkształceń, nienaruszająca pierwotnego kontaktu szyny i podkładu z podłożem. Prezentowana metoda jest szczególnie przydatna w badaniach zmian podparcia toru i może być właściwym narzędziem służącym do oceny pracy obciążonych elementów toru kolejowego.

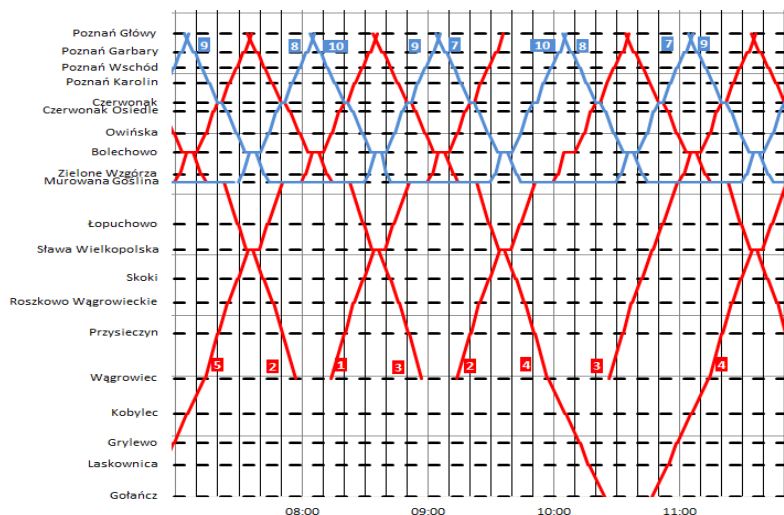
## 2. Badania z zakresu inżynierii ruchu kolejowego i miejskiego

### 2.1. Badania przepustowości szlaków kolejowych

Przedmiotem badań był wpływ modernizacji linii kolejowych na parametry funkcjonalne tych linii. Wykazano problem sprzeczności celów modernizacji, np. zabudowanie lepszych rozjazdów i związane z tym zwiększenie prędkości może zmniejszyć przepustowość linii; wskazano przy tym, że jeżeli dany odcinek nie jest krytyczny dla przepustowości linii, to zwiększenie przepustowości nie jest potrzebne, a należy raczej dążyć do poprawy innych parametrów eksploatacyjnych. Wykazano też, że lokalizacja mijanek optymalizowana dla maksymalizacji przepustowości może powodować duże opóźnienia ruchu pociągów ze względu na konieczność oczekiwania na tych mijankach (rys. 9).

Analizy przepustowości wskazały również problem jej dostosowania do ówczesnych przewozów kolejowych, które podlegały dużym redukcjom. Zaproponowano więc, aby przy modernizacjach przewidywać przyszłościową możliwość rozbudowy układów torowych stacji czy też przywracania niektórych stacji, w razie potrzeb wynikających ze zwiększenia ruchu kolejowego. Dziś można stwierdzić, że wniosek ten okazał się zasadny.

Elementem badań przepustowości były też analizy teoretyczne. Porównano znane metody określania przepustowości i związanych z nią parametrów oraz wskazano ograniczenia dla stosowania poszczególnych metod. Głównymi kryteriami ograniczającymi skuteczność tych metod były znajomość lub brak konkretnego rozkładu jazdy oraz wykonywanie analizy dla punktów krytycznych sieci kolejowej w przeciwieństwie do analiz długich fragmentów linii pozbawionych węzłowych stacji i posterunków.



Rys. 9. Fragment wykresu ruchu pociągów z analizą rozkładu jazdy na linii kolejowej nr 356 na odcinku Poznań Główny – Gołańcz [10]

## 2.2. Analiza przebiegu linii kolejowej dużej prędkości

Teoretyczne badania przepustowości przeprowadzono dla planowanej linii kolejowej dużej prędkości (KDP) Warszawa – Łódź – Poznań / Wrocław, tzw. Y. Wykazano między innymi sensowność obsługi konurbacji kalisko-ostrowskiej przy założeniu synchronizacji dwóch prędkości pociągów: pociągów prędkości 350 km/h jadących bez zatrzymania na stacjach pośrednich i pociągów prędkości 250 km/h zatrzymujących się co 50-100 km.

Przy kolejnych zmianach układu trasy Y zwracano uwagę na niebezpieczeństwo jej wydłużania między Warszawą i Poznaniem. W obecnej sytuacji zaproponowano powrót do oryginalnej koncepcji przebiegu linii KDP na północ od Jeziorska i Kalisza, z budową klasycznych linii kolejowych przez Kalisz (w kierunku Ostrowa Wielkopolskiego) i w kierunku Turku, w tym dla kolei miejskiej dla konurbacji kalisko-ostrowskiej, oraz rezerwację terenu dla budowy linii dużej prędkości na północ od Łodzi.

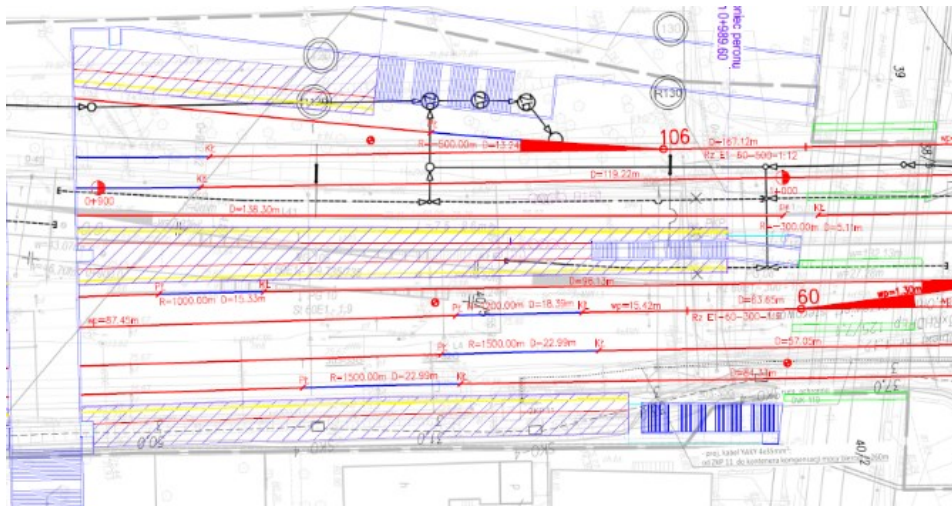
Potencjalny przebieg linii KDP analizowano dla Poznańskiego Węzła Kolejowego (PWK), wskazując możliwość budowy tunelu pod ulicami miejskimi bądź między stacjami Poznań-Starołęka i Poznań-Górczyn. Zaproponowano również układ torowy stacji Poznań Główny uwzględniający przebiegi pociągów dużej prędkości.

## 2.3. Badania Poznańskiego Węzła Kolejowego i potencjału Poznańskiej Kolei Metropolitalnej

Badania przepustowości torów PWK zostały ukierunkowane na ocenę jego potencjału dla budowy Poznańskiej Kolei Metropolitalnej (PKM). Potencjał ten oceniono wysoko, warunkując go jednak połączeniem pociągów regionalnych i aglomeracyjnych w jeden system metropolitalny. Przy takim założeniu wykazano, że jest możliwe uruchomienie 5 tras PKM z półgodzienną częstotliwością, wyznaczając standard tego systemu.

Krytyczne dla systemu PKM okazały się stacja Poznań Główny i sąsiadujące z nią posterunki. Wykazano, że metodami inżynierii ruchu można na dwóch torach osiągnąć przepustowość taką jak bez tych działań na trzech torach. Obecne deklaracje inwestycyjne dla rozbudowy liczby torów na północ od stacji Poznań Główny wymagają z kolei dostosowania układów torowych sąsiednich posterunków dla wykorzystania w maksymalnym stopniu możliwości, jakie te dodatkowe tory dadzą. Zaproponowano też odpowiedni dla zmniejszenia kolizyjności przebiegów układ torowy głowicy południowej uwzględniający między innymi lokalizację planowanego przystanku Poznań-Hetmańska. Analizy dla południowej głowicy stacji Poznań Główny są bardzo ważne również ze względu na planowaną sprzedaż części terenów kolejowych – aby sprzedaż nie zablokowała sobie możliwości rozwojowych. Wnioski z prac bywają uwzględniane w różnych koncepcjach miejskich.





Rys. 10. Proporcja przystanku Poznań-Śródmiście w pracy magisterskiej Marcina Jędrzejczaka, fragment rysunku między mostem Teatralnym i przedłużeniem ul. Słowackiego

System PKM wymaga synchronizacji pociągów na stacji Poznań Główny. W pierwszej wersji zakładano zjazd wszystkich pociągów PKM o określonej porze na tej stacji. System taki wymagał jednak 8-minutowego postoju, ograniczał do 6 liczbę tras PKM i eliminował potrzebną dla niektórych tras 20-minutową częstotliwość. Stwierdzono ponadto, że takie założenie wymagałoby dużych inwestycji poza stacją Poznań Główny – zmiany lokalizacji stacji. Z tych przyczyn uznano, że należy raczej dążyć do synchronizacji przestrzennej – wyznaczenia dla pociągów PKM 4 specjalnych krawędzi peronowych, najlepiej przy dwóch peronach, przy których pociągi pojawiałyby się co 3-5 min. Zamiana koncepcji synchronizacji czasowej na przestrzenną umożliwiła rozwiązanie jeszcze jednego problemu: stacja Poznań Główny z racji swojej wielkości generuje długie drogi dojścia pasażerów, co zmniejsza konkurencyjność kolei metropolitalnej. Zaproponowano więc przebudowę układu torowego na głowicy północnej dla lokalizacji na niej dodatkowego przystanku, nazwanego roboczo Poznań-Śródmiście (rys. 10). Obecnie analizowany jest jeszcze jeden wariant – lokalizacji całej stacji pasażerskiej w tym miejscu.

Badaniami nad PKM objęto również stacje i linie poza terenem PWK. Wskazano na potencjał linii do Pniew dla zapewnienia konkurencyjnego wobec samochodu dojazdu do Poznania. Podobne analizy dla linii Skoki – Mieścisko – Janowiec pokazały wpływ nowych dróg ekspresowych. Wskazano też zasady rozwoju miejscowości wzdłuż linii kolejowych kolei metropolitalnej, aby zachęcić mieszkańców tych miejscowości do korzystania z kolei. Nie zapomniano o ruchu towarowym – zaproponowano system wykorzystujący centrum logistyczne w rejonie Poznania i lokalizację punktów logistycznych.

## 2.4. Badania jakości obsługi pasażera na stacjach i przystankach

Istotnym elementem konkurencyjności kolei jest obsługa pasażerów na dworcach, czyli przestrzeni pieszej w ramach stacji i przystanków. Analizie poddano szczególnie dworce w obrębie zasięgu PKM. Zwracano uwagę na nieuzasadnione wydłużenia przejść dla pieszych, czytelność układu i aspekty psychologiczne. Za konieczne uznano wprowadzenie zasady, że dojście na perony powinno być z obu stron i z obu krańców tego peronu, z dopuszczeniem wyjątków – przykłady takich niekorzystnych dla pasażerów i ograniczających kolejno rozwiązań wskazano na wielu stacjach i przystankach, np. w Palędziu, Luboniu czy stacji Poznań-Garbary.

Szczególną uwagę zwrócono na stację Poznań Główny, proponując gamę rozwiązań umożliwiających poprawę obsługi pasażerskiej. Za konieczne uznano uwzględnienie bliskości stacji w projektach nowej dzielnicy Wolne Tory i rewitalizacji Łazarza.

Elementem tej analizy była również ocena jakości przystanków transportu miejskiego, w szczególności peronów tramwajowych i tramwajowo-autobusowych. Wskazano zalety i wady peronów wiedeńskich i peronów w formie antyzatoki. Za konieczne uznano zmiany w prawie pozwalające projektować dojścia do peronów z obu ich krańców również na ulicach wyższych klas – udowodniono, że nie pogorszy to jakości ruchu samochodowego.

## 2.5. Trasowanie tras tramwajowych

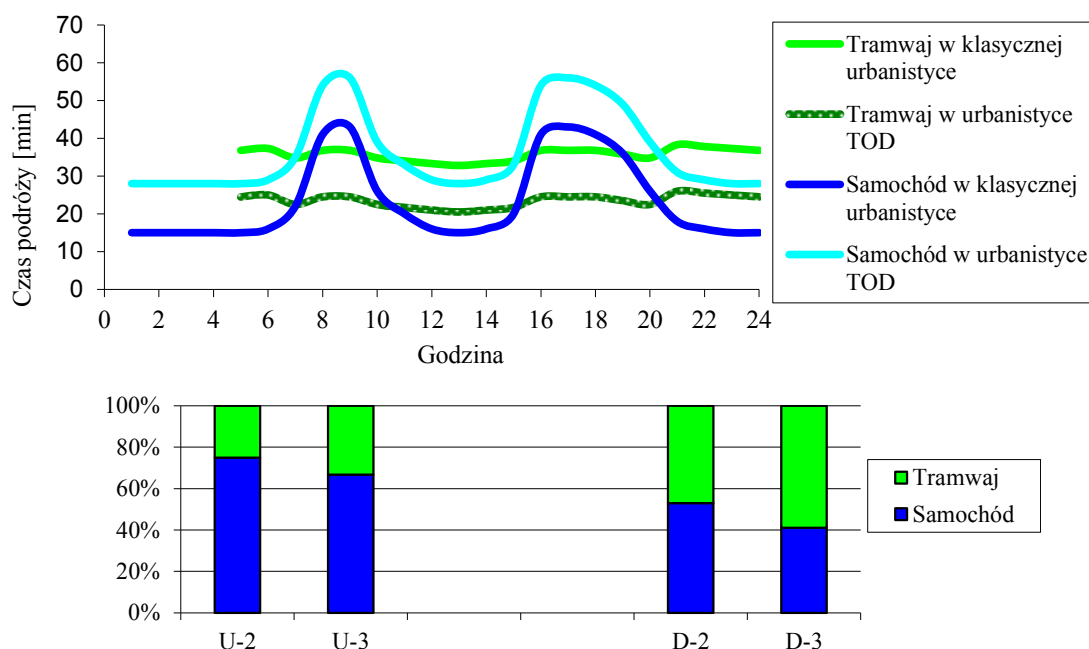
Badania nad optymalnym przebiegiem tras tramwajowych wskazały na konieczność znaczącej zmiany w systemie ich planowania. Trasy te powinny być prowadzone wzdłuż ulic klasy L i Z lub jako wydzielone drogi publiczne. Wykazano bowiem wiele wad planowania tych tras w przestrzeniach ulic wyższych klas (rys. 11):

- utrudnione dojście pasażerów,
- problemy z realizacją priorytetu tramwajowego,
- problemy z kształtowaniem węzłów tramwajowych, szczególnie na skrzyżowaniach ważniejszych ulic.

Ważne jest też, aby lokalizacja ograniczeń prędkości, takich jak przejścia dla pieszych, łuki poziome czy rozjazdy, była ograniczona do obszarów przystanków tramwajowych.

Ciekawym efektem prac nad kolizyjnością węzłów tramwajowych było wykazanie, że przy braku ruchu samochodowego lub jego niewielkim natężeniu nawet bardzo duża kolizyjność nie generuje zauważalnych problemów z prowadzeniem ruchu tramwajów.

Za konieczne uznano dostosowanie przepisów projektowania tras tramwajowych do obecnych potrzeb pasażerów i standardu nowych tramwajów. Wykazano, że przy projektowaniu tras należy zastosować metody wykorzystywane w projektowaniu dróg kolejowych, ze szczególnym uwzględnieniem stosowania krzywych przejściowych. Pokazano też, na ile nowoczesny tabor zwiększa komfort pasażerów i obniża koszty utrzymania, a na ile odwrotnie – wymaga stosowania bardziej wymagających rozwiązań. Badania objęły również możliwość zwiększenia prędkości tramwajów z zachowaniem bezpieczeństwa ruchu.



Rys. 11. Proporcje w przewozach tramwajowych i samochodowych w zależności od zagospodarowania terenu według zasady „zwycięzca bierze wszystko”: U-2: udział godzin, w których przy klasycznej urbanistyce samochód osiąga lepszy czas niż tramwaj; U-3: udział godzin, w których samochód przy klasycznej urbanistyce osiąga lepszy czas niż tramwaj przy urbanistyce TOD – urbanistyce optymalizowanej dla transportu publicznego; D-2: udział osób korzystających z samochodu i tramwaju przy proporcji U-2; D-3: udział osób korzystających z samochodu i tramwaju przy proporcji U-3 [17]

## 2.6. Inne zagadnienia

### 2.6.1. Wprowadzenie

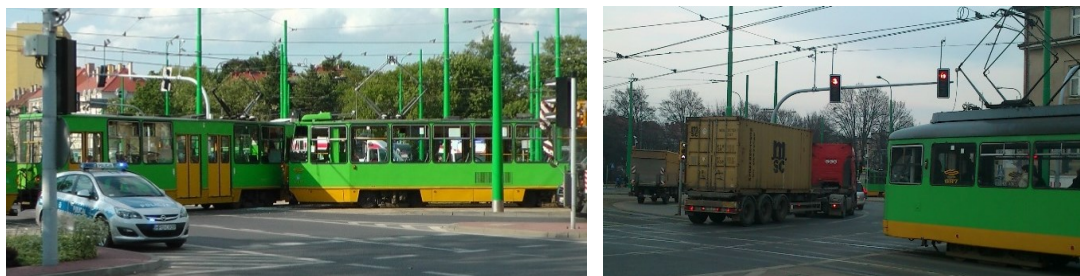
Analizy trasowania tras tramwajowych rozszerzono na kształtowanie całej przestrzeni ulicy. Wykazano, że obecna klasyfikacja ulic była optymalizowana pod ruch samochodów osobowych, co generuje problemy przy określaniu parametrów ulic pieszych, rowerowych, tramwajowych czy w obszarach przemysłowych. Rozważano też, na ile i na jakich warunkach można zrezygnować ze spełnienia parametrów dla danej klasy – wykazano, że warunkiem jest jednak systemowe podejście do wszystkich parametrów. Wskazano też, że niezbędnym elementem klasyfikacji ulic powinno być uwzględnienie natężenia ruchu.

## 2.6.2. Kształtowanie przestrzeni ulicy

Istotnym elementem dbania o jakość ruchu tramwajowego jest odpowiednie sterowanie ruchem, w szczególności chodzi o priorytet na sygnalizacji świetlnej. W zakresie priorytetu tramwajowego opracowano:

- klasyfikację funkcjonalną i warunkową priorytetu,
- zasady lokalizacji czujników dla realizacji danego poziomu priorytetu,
- uzasadnienia dla ograniczenia priorytetu,
- zasady stosowania priorytetu przy lokalizacji peronu tramwajowego przed skrzyżowaniem,
- wpływ priorytetu na przepustowość tras tramwajowych.

Zwrócono również uwagę na problem obsługi pojazdów transportu zbiorowego na rozbudowanych skrzyżowaniach, w szczególności na jakość i bezpieczeństwo ruchu (rys. 12).



*Rys. 12. Rondo J. Nowaka-Jeziorańskiego. Zdarzenie: dwa tramwaje zderzyły się wskutek złych przepisów projektowania sygnalizacji i blokowania tramwaju przez samochód ciężarowy – w wyniku niedoskonałości programu sygnalizacji świetlnej [16]*

## 3. Badania warunków pracy, oceny właściwości i jakości podtorza kolejowego

### 3.1. Wprowadzenie

W przebudowie podtorza dróg kolejowych dla jego modernizacji lub naprawy osiągane są trzy główne cele: ulepszenie stanu powstałego wskutek zastosowanych metod i wymagań w czasie budowy często w odległej przeszłości, usunięcie skutków wieloletniej eksploatacji, dostosowanie do nowych warunków eksploatacji (powiększania prędkości, nacisków i przewozów, zmian układu geometrycznego drogi itp.). Jeżeli podtorze nie wykazuje niestateczności w dotychczasowym użytkowaniu i nie następuje zmiana układu geometrycznego drogi, głównym zabiegiem modernizacyjnym lub naprawczym jest wzmocnienie górnej strefy podtorza przez wbudowanie warstwy ochronnej i ewentualna zmiana warunków odwodnienia. Dotychczasowa górna strefa podtorza zostaje zastąpiona nową konstrukcją, którą tworzą subwarstwy z materiałów naturalnych lub z kamienia łamanego, w razie potrzeby zawierające geokompozyty. Grubość warstwy ochronnej obliczana jest z uwzględnieniem wyników badań geotechnicznych, to jest rodzajów i właściwości gruntów. Przebudowa wykonywana jest przy zastosowaniu maszyn do robót ziemnych i typowych technologii lub pociągami do napraw podtorza. Weryfikacja projektu grubości warstwy następuje podczas prac modernizacyjnych lub naprawczych. W badaniach geotechnicznych porównuje się parametry gruntów przyjętych do projektu z rzeczywistymi parametrami gruntów podtorza przebudowywanego. Po zakończeniu prac budowlanych dokonuje się ich odbioru z oceną geotechnicznych parametrów odbiorczych, tj. wartości wtórnych modułów odkształcenia określanych na torowisku oraz wskaźników zagęszczenia.

W badaniach prowadzonych w Pracowni Dróg Kolejowych rozpatrywane są różne aspekty opisanego wyżej procesu modernizacji lub napraw podtorza, ze szczególnym uwzględnieniem jego górnej strefy. Analizowane są metody projektowania i wykonawstwa wzmocnień, technologie robót naprawczych oraz modernizacyjnych oraz ich wpływu na czas i końcowy efekt prac, metody oceny stanów odkształcalności i zagęszczenia górnej strefy podtorza.

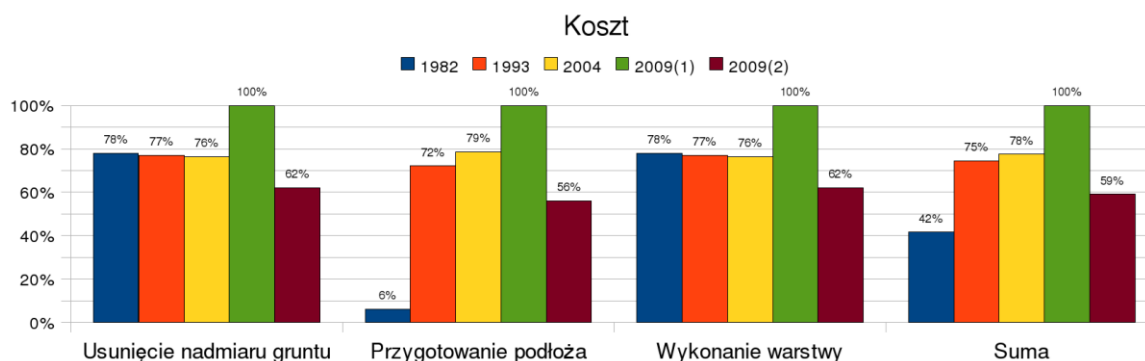
### 3.2. Badania i analizy metod projektowania i wykonawstwa wzmocnień górnej strefy podtorza

W badaniach metod projektowania i wykonawstwa wzmocnień górnej strefy podtorza analizowano: wpływ zmian w przepisach o podtorzu na stan jego odkształcalności po modernizacji, możliwość wzmocnienia górnej

strefy podtorza warstwą ochronną o ustalonej grubości, wykazano ograniczoną stosowalność modułów odkształcenia w procesie przebudowy podtorza oraz opracowano wykresy do szybkiego projektowania lub kontroli wzmocnień górnej strefy podtorza.

### 3.2.1. Analiza wpływu zmian w przepisach o podtorzu na stan jego odkształcalności po modernizacji

Analizowano wpływ zmian wymagań w projektowaniu i w wykonawstwie wzmocnień górnej strefy podtorza wprowadzanych do kolejnych wersji przepisów o podtorzu na procesy projektowania i przebudowy podtorza, ze szczególnym uwzględnieniem objętości i kosztów robót. Wykazano, że kolejne edycje instrukcji o podtorzu wprowadzały istotne zmiany warunków projektowania, budowy i utrzymania podtorza, wpływając na przyrosty kosztów budowy warstwy (rys. 13). Z tego względu należy zwrócić uwagę na szczegółowe rozpoznanie geotechniczne podtorza do projektu i liczenie się w wykonawstwie z założeniami zastosowanymi w projekcie – materiałowymi i technologicznymi. Ponadto przyjęte w ostatnich przepisach zmniejszenie wymagań odbiorczych może powodować powiększenie niejednorodności górnej strefy podtorza. Z tego względu należy rozważyć w kolejnej edycji przepisów zmniejszenie przedziałów wartości modułów wtórnego odkształcenia projektowych i wymaganych, powiększając wartości wymagane [18].



Rys. 13. Koszty budowy warstwy ochronnej według projektów wykonanych na podstawie wymagań kolejnych przepisów o podtorzu, na długości przykładowego odcinka magistralnej linii magistralnej, w odniesieniu do projektu wykonanego według aktualnie obowiązujących wymagań [18]

### 3.3. Badania i analizy technologii robót naprawczych oraz modernizacyjnych podtorza i ich wpływu na czas oraz jakość realizacji wzmocnień górnej strefy podtorza

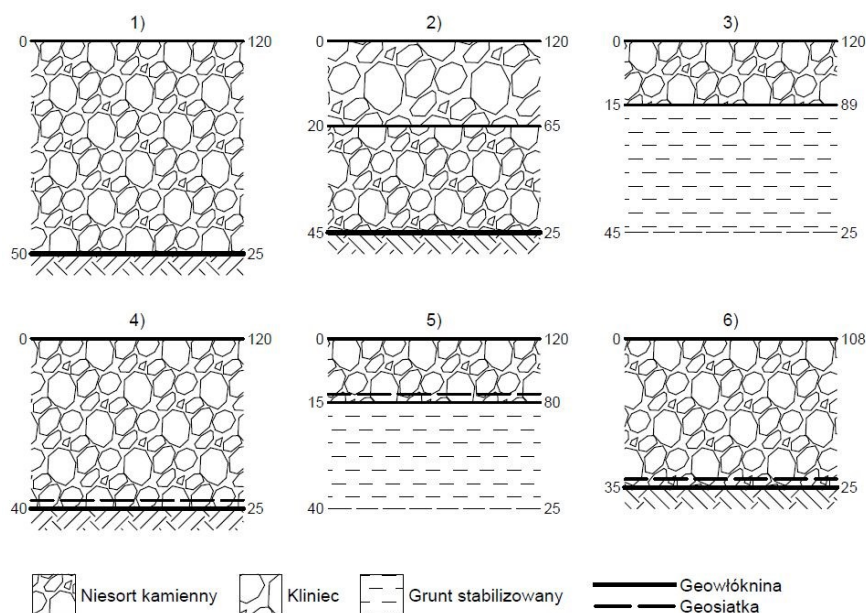
W badaniach dotyczących technologii robót naprawczych oraz modernizacyjnych podtorza i ich wpływu na czas oraz jakość realizacji wzmocnień górnej strefy podtorza analizowano: możliwość zastosowania równoważnych konstrukcji wzmocnień górnej strefy podtorza, rodzaje przyczyn, sposoby ich rozpoznania oraz eliminacji, brak pełnych efektów wzmocnienia podtorza warstwą ochronną, wpływ sposobu ograniczenia ruchu pociągów na czas realizacji robót podtorzowych.

#### 3.3.1. Równoważne konstrukcje wzmocnień górnej strefy podtorza

Rozważano możliwość zastąpienia zaprojektowanej konstrukcji wzmocnienia górnej strefy podtorza inną równoważną jej postacią. Taka potrzeba może zaistnieć w przypadku, gdy w terenie występują ograniczenia geometryczne lub techniczne, nierozpoznane przed sporządzeniem projektu wzmocnienia górnej strefy podtorza, np. z uwagi na punktowe przedprojektowe badania podtorza. Analizowano następujące konstrukcje wzmocnienia podtorza: jednorodną (pojedynczą) warstwę ochronną z kruszywa łamanego o uziarnieniu 0/31,5 mm (niesortu kamiennego); warstwę ochronną składającą się z dwóch subwarstw: dolnej z niesortu i górnej z kłińca; pojedynczą warstwę ochronną z niesortu o minimalnej grubości na podłożu stabilizowanym spoiwem hydraulicznym (np. cementem); pojedynczą warstwę ochronną z niesortu wzmocnioną geosiatką; pojedynczą warstwę ochronną o minimalnej grubości z niesortu wzmocnioną geosiatką na podłożu stabilizowanym chemicznie; zastosowanie w konstrukcji nawierzchni podkładów z podkładkami



antywibracyjnymi (z żelówkami), co z uwagi na lepszą współpracę podkładów z podsypką umożliwia zredukowanie nacisków przekazywanych z nawierzchni na podtorze (rys. 14).



Rys. 14. Równoważne konstrukcje wzmocnień podtorza: 1) warstwa pojedyncza, 2) warstwa podwójna, 3) warstwa pojedyncza na podtorzu stabilizowanym chemicznie, 4) warstwa pojedyncza z geosiatką, 5) warstwa pojedyncza z geosiatką na podtorzu stabilizowanym chemicznie, 6) warstwa pojedyncza z geosiatką, podkłady z żelówkami [21]

Wykazano, że w uzasadnionych przypadkach, np. gdy występują ograniczenia geometryczne, można odstąpić od zaprojektowanej grubości warstwy ochronnej i zastosować zastępczą warstwę ochronną równoważną. Wytrzymałość, nośność i grubość stosowanej warstwy ochronnej równoważnej należy określić z uwzględnieniem wyników szczegółowych badań podtorza na budowie i stwierdzonych ograniczeń geometrycznych lub technicznych. Podobny efekt z zastosowaniem warstwy równoważnej można osiągnąć, stosując „odciążenie” podtorza przez zastosowanie zmian konstrukcyjnych lub geometrycznych w nawierzchni kolejowej [21].

### 3.3.2. Rodzaje przyczyn, sposoby ich rozpoznania oraz eliminacji, braku pełnych efektów wzmocnienia podtorza warstwą ochronną

Na podstawie analizy wielu rzeczywistych przypadków przebiegu przebudowy górnej strefy podtorza podjęto próbę klasyfikacji przyczyn problemów z uzyskaniem wymaganych wartości geotechnicznych parametrów odbiorczych podtorza z warstwą ochronną (wtórnych modułów odkształcenia określanych na torowisku i wskaźników zagęszczenia). Ustalono dwadzieścia najczęstszych przyczyn braku możliwości uzyskania wymaganych wartości geotechnicznych parametrów odbiorczych i sklasyfikowano je w czterech zbiorach: pogorszenie warunków gruntowo-wodnych, błędy projektowe i wykonawcze oraz ograniczenia konstrukcyjno-wykonawcze.

Zauważono, że występowanie pojedynczych lub splotu różnorodnych czynników mających wpływ na rezultat wzmocnienia podtorza warstwą ochronną w efekcie sprowadza się do sytuacji, w której: wystąpiły niekorzystne okoliczności mające wpływ na wartości parametrów odbiorczych; konstrukcja warstwy ochronnej jest o budowie nieadekwatnej do rzeczywistości warunków gruntowo-wodnych; warstwa ochronna uformowana jest z materiałów o nieprawidłowych właściwościach; podtorze z warstwą ochronną charakteryzuje się właściwościami (np. wilgotność, stan zagęszczenia) uniemożliwiającymi uzyskanie wymaganych wartości parametrów odbiorczych.

Ustalono, że kompleksowe rozpoznanie przyczyn braku pełnych efektów wzmocnienia podtorza warstwą ochronną, w zależności od zaistniałych okoliczności, potrzeb wynikających z warunków miejscowych oraz wartości deficytu wartości parametrów odbiorczych, powinno zawierać: analizę projektu wzmocnienia podtorza i dokumentacji geotechnicznej; wywiad z kierownictwem budowy i analizę zapisów w dzienniku budowy dotyczących przeprowadzonych robót ziemnych oraz sposobów budowy warstwy ochronnej; wykonanie przekopu kontrolnego dla sprawdzenia konstrukcji i grubości

warstwy oraz makroskopowej oceny właściwości materiałów warstwy oraz gruntów podtorza; pomiar modułów odkształcenia podtorza na poziomie robót ziemnych w przekopie kontrolnym; laboratoryjną kontrolę właściwości kruszyw warstwy i gruntów podtorza z wykorzystaniem próbek pobranych z przekopu kontrolnego; ocenę odkształcalności zastosowanej geowłókniny pod obciążeniem; ponowny pomiar odkształcalności podtorza z warstwą ochronną w sąsiedniej lokalizacji.

Rozpoznanie przyczyn problemów z uzyskaniem wymaganych wartości geotechnicznych parametrów odbiorczych podtorza, z wykorzystaniem wskazanych wyżej metod, umożliwia dobór i wdrożenie odpowiednich działań naprawczych mających na celu uzyskanie projektowych stanów odkształcenia i zagęszczania podtorza. W zależności od rozmiaru deficytu wartości parametrów odbiorczych, rodzaju zdiagnozowanych przyczyn, możliwości technicznych wykonawcy robót i dostępności niezbędnych materiałów budowlanych stosuje się jeden lub równocześnie kilka sposobów działań na poprawę właściwości podtorza.

Dla zachowania ciągłości procesu budowlanego i wykluczenia niebezpieczeństwa przekroczenia terminów realizacji inwestycji ważne są: szybkie zdiagnozowanie przyczyn występowania deficytu wartości geotechnicznych parametrów odbiorczych podtorza oraz dobór i wdrożenie odpowiednich działań naprawczych. W tym celu można posłużyć się opracowanym autorskim algorytmem zawierającym ciąg zdefiniowanych czynności prowadzących do rozwiązania problemu braku pełnych efektów wzmocnienia podtorza warstwą ochronną [20].

### **3.3.3. Wpływ sposobu ograniczenia ruchu pociągów na czas realizacji robót podtorzowych**

Na podstawie doświadczeń z modernizacji fragmentu linii kolejowej nr 6 badano wpływ sposobu ograniczenia ruchu pociągów na czas realizacji przebudowy górnej strefy podtorza. W analizie ustalono, że decyzja o częściowym lub całkowitym zamknięciu linii powinna być podejmowana z uwzględnieniem rodzaju, zakresu i przewidzianego czasu planowanych robót oraz skali występujących w trakcie realizacji prac utrudnień w ruchu pasażerskim i towarowym. Wykonywanie robót naprawczych i modernizacyjnych podtorza w trybie zamknięcia dwutorowego umożliwia m.in.: zachowanie większego bezpieczeństwa prowadzonych prac, lepszą koordynację międzybranżową robót, uzyskanie większej ich dokładności oraz znaczne skrócenie czasu realizacji inwestycji. Możliwość swobodnego dysponowania o wykorzystaniu sąsiedniego toru przez wykonawcę ma decydujący wpływ na czas realizacji robót podtorzowych. Czas wykonywania robót, polegających na przygotowaniu podtorza i budowie warstwy ochronnej na analizowanym odcinku, był prawie 2,4 razy krótszy w trybie zamknięcia dwutorowego od czasu realizacji tych samych robót w trybie zamknięć jednotorowych [19].

### **3.4. Badania i analizy metod oceny stanów odkształcalności i zagęszczenia górnej strefy podtorza**

Badania i analizy metod oceny stanów odkształcalności i zagęszczenia górnej strefy podtorza obejmowały badania wielkowymiarowych modeli podtorza kolejowego oraz próbę określenia kształtu i rozmiaru płyty badawczej do określania nośności oraz odkształcalności górnej strefy podtorza (rys. 15).



Rys. 15. Stanowisko badawcze wraz z aparaturą do oceny nośności i zagęszczenia wielkowymiarowych modeli podtorza kolejowego [22]

Prowadzono laboratoryjne eksperymenty na wielkowymiarowych modelach podtorza kolejowego mające na celu analizę metod oceny stanów odkształcalności i zagęszczenia górnej strefy podtorza. W badaniach tych:

- podjęto próbę określenia zależności wskaźników odkształcenia i zagęszczenia dla różnych materiałów podtorza i rzeczywistych układów podtorza – warstwa ochronna, wykazano wpływ wilgotności niesortu na jego właściwości [22];
- oszacowano niepewności pomiarowe w pomiarach odkształcalności podtorza;
- wskazano, że stosowanie geowłóknin w górnej strefie podtorza może utrudniać ocenę stanu jego odkształcalności w próbnym obciążeniu; udowodniono, że im grubsza warstwa ochronna, tym wpływ wbudowanej geowłókniny na odkształcalność podtorza jest mniejszy, że wybór geowłókniny o odpowiednich właściwościach prawie całkowicie eliminuje problem zmian grubości geowłókniny separacyjnej pod obciążeniem w trakcie wykonywania próbnego obciążenia podtorza.

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy obciążonych elementów nawierzchni i podtorza oraz układów torowych wraz z infrastrukturą kolejową można sformułować następujące wnioski i spostrzeżenia:

- 1) Dla zamierzonej postaci odkształcenia w torze (jego podnoszenia) zaproponowano metodę pomiaru w rzeczywistym torze kolejowym: siły podnoszącej, strzałki i długości podnoszenia toru kolejowego.
- 2) W przypadku odkształcenia w torze w postaci niejednorodności w podłożu podkładów wywołano zamierzoną nierówność o znanych początkowych wartościach długości fali odkształcenia i jego strzałki. Wpływ tego odkształcenia uwidacznia się dopiero pod wpływem przyłożonego obciążenia.
- 3) Stwierdzono, że wywołane odkształcenia o strzałce nierówności  $f_0$  w torze zmieniają w istotny sposób pracę obciążonych elementów nawierzchni kolejowej (ugięcia czy naprężenia w poszczególnych elementach). Podobna postać odkształcenia w torze (nierówności pionowe) powstaje podczas jego eksploatacji.
- 4) Zaproponowana metoda generowania odkształceń w torze kolejowym (przez umieszczanie blach dystansowych w torze oraz umieszczanie czujników pomiarowych w podkładce szynowej) pozwala na symulowanie zamierzonej jej postaci o znanych początkowych wartościach długości  $l_0$ , a przede wszystkim żądanej strzałki  $f_0$  nierówności. Prezentowana metoda jest szczególnie przydatna w badaniach zmian podparcia toru i może być właściwym narzędziem służącym do oceny pracy obciążonych elementów toru kolejowego.
- 5) Omawiana metoda generowania i pomiaru odkształceń w torze może być wykorzystana w badaniach współdziałania taboru z eksploatowanym torem, szczególnie w zmieniających się warunkach jego podparcia. Szczególnie ważny jest właściwy pomiar siły przekazywanej z szyny na podkład kolejowy (zwłaszcza w przypadku zmiennego w czasie podparcia podkładu

eksploatowanego toru kolejowego). Określenie wartości tej siły pozwala na analizę pracy podkładu kolejowego spoczywającego na podłożu gruntowym.

- 6) Kryteria oceny jakości ruchu kolejowego powinny być dobierane odpowiednio do celu, jakiemu linia kolejowa ma służyć. Wskazano przykłady, gdzie dążenie do zwiększenia przepustowości nie było uzasadnione, a jednocześnie spowodowało pogorszenie pożądaných parametrów, takich jak płynność ruchu czy czasy regulacji.
- 7) Wykazano, że metodami inżynierii ruchu, a więc przy odpowiednim doborze urządzeń s.r.k. oraz dobrej organizacji ruchu, można zastąpić kosztowne inwestycje, np. budowę trzeciego toru. Jednym z kluczowych rozwiązań jest analiza i redukcja kolizyjności przebiegów.
- 8) Przepustowość elementów sieci tramwajowej staje się istotnym elementem analizy dla modernizacji i remontów infrastruktury. Konieczne jest sprawdzenie optymalnej intensywności ruchu. Wykazano, że stosunek optymalnej intensywności ruchu do przepustowości zależy od regularności kursów w analizowanym strumieniu. Wskazano na potrzebę zmiany sposobu planowania tras tramwajowych, które powinny być budowane poza korytarzami ulic wysokiej klasy.
- 9) Opracowano klasyfikację priorytetu tramwajowego z podziałem na klasyfikację funkcjonalną oraz klasyfikację uwarunkowań. Dla poszczególnych poziomów priorytetu przedstawiono wymogi lokalizacji detekcji. Wskazano, że odpowiednio wczesna detekcja i właściwie dobrana metoda sterowania może zminimalizować wpływ priorytetu na jakość ruchu samochodowego. Zaproponowano też zmiany w sposobie projektowania sygnalizacji tramwajowych – część propozycji została wykorzystana przy nowelizacji rozporządzenia.
- 10) Analizowano trasowanie linii kolejowych dla osiągnięcia prędkości konkurencyjnych wobec ruchu samochodowego. Przedmiotem zainteresowania były linie drugorzędne zlikwidowane lub z ruchem zawieszonym – ich układ geometryczny pozwala w razie odbudowy na prowadzenie konkurencyjnego transportu, o ile dla analizowanej relacji nie zbudowano drogi ekspresowej.
- 11) Próbnе obciążenia podtorza powinny stanowić jeden z elementów geotechnicznych badań polowych. Wyniki tych badań uzupełnione wynikami badań laboratoryjnych powinny być podstawą projektowania wzmocnień podtorza. Dla praktycznych zastosowań opracowano wykresy upraszczające procesy projektowania i bieżącej kontroli wykonawstwa warstw ochronnych.
- 12) Kolejne edycje instrukcji o podtorzu wprowadziły istotne zmiany warunków projektowania, budowy i utrzymania podtorza. Wykazano, że zastosowanie osobnych kryteriów projektowych i odbiorczych może prowadzić do zwiększenia niejednorodności górnej strefy podtorza. Z tego powodu należy rozważyć możliwość zwiększenia wymaganych wartości modułów wtórnego odkształcenia.
- 13) Dla zachowania ciągłości procesu budowlanego i wykluczenia niebezpieczeństwa przekroczenia terminów realizacji inwestycji ważne są szybkie zdiagnozowanie przyczyn występowania deficytu wartości parametrów odbiorczych podtorza oraz dobór i wdrożenie odpowiednich działań naprawczych, np. zweryfikowanych konstrukcji równoważnych. Można w tym celu posłużyć się autorskim algorytmem do rozwiązywania problemów z brakiem pełnych efektów wzmocnienia podtorza warstwą ochronną.
- 14) Decyzja o częściowym lub całkowitym zamknięciu linii na czas realizacji robót naprawczych lub modernizacyjnych powinna być podejmowana z uwzględnieniem rodzaju, zakresu i przewidzianego czasu planowanych robót oraz skali występujących w trakcie ich realizacji utrudnień w ruchu pasażerskim i towarowym. Wykonywanie robót naprawczych i modernizacyjnych podtorza w trybie zamknięcia dwutorowego umożliwia m.in.: zachowanie większego bezpieczeństwa prowadzonych prac, uzyskanie większej dokładności robót, lepszą koordynację międzybranżową robót oraz znaczne skrócenie czasu realizacji inwestycji.
- 15) Kształt i układ płyt obciążających służących do pomiarów odkształcalności podtorzy kolejowych należy tak dobrać, by wywołać stan naprężenia w podtorzu analogiczny z występującym w rzeczywistości. Warunki współpracy nawierzchni kolejowej z podtorzem można przybliżyć w badaniach podtorza, stosując płyty czworokątne (do wstępnych badań aplikacyjnych wskazano płytę prostokątną o wymiarach 26 × 27,5 cm).
- 16) Uzyskanie w badaniach kontrolnych podtorza z warstwą ochronną, wykonywanych bezpośrednio po zakończeniu procesu zagęszczania warstwy z kruszywa łamanego o wilgotności zbliżonej do optymalnej, przy osiągnięciu wymaganych wartości wskaźnika zagęszczenia, mniejszych od spodziewanych wartości wtórnego modułu odkształcenia, może wynikać z wpływu wilgotności kruszywa na wartości wtórnych modułów odkształcenia podtorza.

## Literatura

- [1] Bednarek W., Wpływ pionowych odkształceń nawierzchni i podtorza na pracę toru bezстыkowego, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.



- [2] Bednarek W., Wybrane zagadnienia współpracy nawierzchni z podłożem podczas eksploatacji bezстыkowego toru kolejowego, „Przegląd Komunikacyjny” 2014, 10, s. 5-12.
- [3] Bednarek W., Determination of Foundation coefficients for a 2-Parameter Model on the Basis of Railway sleeper Deflection, „Continuous Media with Microstructure” 2016, 2, pp. 325-341, ISBN: 978-3-319-28239-8, ISBN: 978-3-319-28241-1 (e-book), DOI: 10.1007/978-3-319-28241-1\_21 (rozdział w monografii naukowej).
- [4] Bednarek W., Zagadnienia powstających pionowych nierówności w eksploatowanym torze kolejowym, „Przegląd Komunikacyjny” 2016, 2, s. 18-26.
- [5] Bednarek W., Analiza wpływu wybranych imperfekcji podłoża szynowego na ugięcia szyny bezстыkowego toru kolejowego, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej (Archives of Institute of Civil Engineering)” 2017, t. 25, s. 19-34.
- [6] Bednarek W., Wpływ zmiany podparcia i kontaktu bezстыkowego toru kolejowego z podłożem na jego pracę, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej (Archives of Institute of Civil Engineering)” 2017, t. 25, s. 35-49.
- [7] Bednarek W., Wpływ nacisku koła pojazdu i powstających imperfekcji podparcia bezстыkowego toru kolejowego na jego pracę podczas eksploatacji, „Przegląd Komunikacyjny” 2018, 10, s. 2-8.
- [8] Bednarek W., Analysis of static forces generated in-track on a railway sleeper resting on an elastic foundation due to structural imperfections using the PONTOS system, „MATEC Web of Conferences” 2019, 262, 11001, p. 6, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926211001>.
- [9] Bednarek W., An influence of a generated track intentional irregularity on a static work of a railway track, „Archives of Civil Engineering” 2021, 1 (po recenzjach i po akceptacji do opublikowania).
- [10] Kosicki D., Rychlewski J., Uwarunkowania uruchomienia pierwszego etapu realizacji poznańskiej kolei metropolitalnej. W: A. Krych, Celowość, efektywność i skuteczność projektu transportowego – logika interwencji SITK, Poznań 2015, s. 153-168.
- [11] Rychlewski J., Bul R., Kolej aglomeracyjna jako podstawowy element systemu transportu publicznego w aglomeracji poznańskiej. W: T. Kaczmarek, Transport publiczny w aglomeracji poznańskiej – propozycje usprawnień, Bogucki, Poznań 2012, s. 35-48.
- [12] Rychlewski J., Pawłowski M., Problemy przeprowadzenia trasy kolei dużych prędkości przez aglomerację poznańską, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2017, 25, s. 323-334.
- [13] Plucińska E., Czas pasażera jako ważny element inwestycji kolejowej, „Przegląd Komunikacyjny” 2015, 9, s. 149-151.
- [14] Kruszyna M., Rychlewski J., Influence of approaching tram on behaviour of pedestrians in signalised crosswalks in Poland, „Accident Analysis and Prevention” 2013, 55, pp. 185-191.
- [15] Rychlewski J., Firlik B., Straszewski W., Wytyczne projektowania torów tramwajowych a obecnie używany tabor tramwajowy, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2017, 25, s. 335-356.
- [16] Rychlewski J., Kosicki D., Sterowanie ruchem na węzłach tramwajowych. W: A. Krych, Polskie inwestycje transportowe – doświadczenia, badania i przyszłość, SITK, Poznań 2017, s. 405-418.
- [17] Rychlewski J., Street network design for a sustainable mobility system, „Transport Research Procedia” 2016, 14, pp. 528-537.
- [18] Siewczyński Ł., Pawłowski M., Analiza wpływu zmian w przepisach o podtorzu na stan jego odkształcalności po modernizacji, „Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej” 2011, 9, s. 39-62.
- [19] Pawłowski M., Protosawicki K., Straszewski W., Wpływ sposobu ograniczenia ruchu pociągów na czas realizacji robót podtorzowych, „Przegląd Komunikacyjny” 2018, 10, s. 25-29.
- [20] Siewczyński Ł., Pawłowski M., Algorytm postępowania w przypadku braku pełnych efektów wzmocnienia podtorza warstwą ochronną, „Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie” 2019, 2(119), s. 217-227.
- [21] Siewczyński Ł., Pawłowski M., Stosowanie równoważnych konstrukcji wzmocnień górnej strefy podtorza, „Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie” 2016, 2(109), s. 137-146.
- [22] Pawłowski M., Zależność wskaźnika zagęszczenia od wskaźnika odkształcenia kruszyw na podstawie próbnych obciążeń płytą statyczną. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2010.

