

Aleksandra Pawlak-Burakowska<sup>1</sup>  
Rafał Wajer<sup>2</sup>

## OCENA PRAWIDŁOWOŚCI GEOMETRYCZNEJ ORAZ JAKOŚCI KONSTRUKCJI WĘZŁA TRAMWAJOWEGO NA PODSTAWIE ZREALIZOWANYCH BADAŃ

### Streszczenie

*W pracy przedstawiono wyniki oraz analizę podstawowych parametrów geometrycznych węzła tramwajowego ul. Basztowa – ul. Długa w Krakowie. Odniesiono się do wymagań polskich oraz zagranicznych w zakresie kształtowania skrzyżowań torów tramwajowych – dokonując jednocześnie przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych. W pracy dokonano analizy problemów związanych z eksploatacją skrzyżowań tramwajowych pod kątem bezpieczeństwa ruchu. Wskazano kierunki doskonalenia konstrukcji oraz przepisów w zakresie węzłów tramwajowych.*

**Słowa kluczowe:** *nawierzchnia tramwajowa, krzyżownice, geometria toru tramwajowego, skrzyżowania tramwajowe, rozjazdy tramwajowe, węzeł tramwajowy*

### 1. Wprowadzenie

Modernizacja torowiska tramwajowego wymaga ogromnych nakładów finansowych – to inwestycja niezbędna w celu zapewnienia odpowiedniej jakości i bezpieczeństwa komunikacji miejskiej. Modernizacja ma na celu poprawę warunków eksploatacji torowiska poprzez zwiększenie prędkości, zapewnienie spokojności jazdy, zmniejszenie drgań i hałasu - przy zapewnieniu odpowiednio długiej trwałości 20-

---

<sup>1</sup> mgr inż., Politechnika Krakowska, Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, Polska, apawlak@pk.edu.pl, tel. 12 628 23 58

<sup>2</sup> mgr inż., Vias y Construcciones S.A., tel. +48 535 168 953, mail: rafal.wajer@vias.es

30 lat. Jak jednak wiadomo, polskie przepisy z zakresu projektowania, budowy i utrzymania torowisk tramwajowych nie należą do najbardziej aktualnych, a modernizacje wykonywane w ich świetle mogą pozostawiać wiele do życzenia.

Celem przeprowadzonych badań oraz niniejszego artykułu jest analiza problemów związanych z eksploatacją węzłów tramwajowych pod kątem trwałości konstrukcji oraz bezpieczeństwa. Opisane poniżej badania zostały przeprowadzone na zlecenie Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego w Krakowie. Pełna dokumentacja dotycząca wyników badań znajduje się w opracowaniu „*Analiza jakości eksploatacyjnej skrzyżowań torów tramwajowych z uwagi na bezpieczeństwo ruchu pociągów tramwajowych*”, a niniejszy artykuł przedstawia najważniejsze analizy.

## **2. Przegląd polskich i zagranicznych przepisów dotyczących konstrukcji oraz bezpieczeństwa ruchu na torowiskach tramwajowych**

Obecnie wykorzystywane w projektowaniu dróg tramwajowych polskie przepisy i wytyczne [1, 2, 3] nie są w pełni dostosowane do nowych rozwiązań konstrukcyjnych coraz szerzej stosowanych na świecie, a także do nowoczesnego taboru. Analizując przytoczone dokumenty można zauważyć braki wytycznych odnośnie kształtowania węzłów rozjazdowych, jak również zaleceń do projektowania nawierzchni ze względu na ich trwałość. Unormowanie takich parametrów jest kluczowe ze względu na podniesienie bezpieczeństwa ruchu pociągów tramwajowych.

Przegląd zagranicznych wytycznych w tym zakresie wykazał, iż w krajach Europy zachodniej, między innymi w Hiszpanii i Wielkiej Brytanii, wykorzystywane są wytyczne niemieckie BOStrab [4,5]. Są to obszernie przepisy, zawierające szczegółowe rysunki geometrii rozjazdów, oraz sprecyzowane dopuszczalne odchylenia od wartości nominalnych geometrii toru. Przepisy określają m.in. następujące wartości:

- odchyłka rozstawu toru  $\pm 2$  mm przy zastosowaniu nowych materiałów, oraz  $+5/-2$  mm przy zastosowaniu materiałów staro użytecznych;

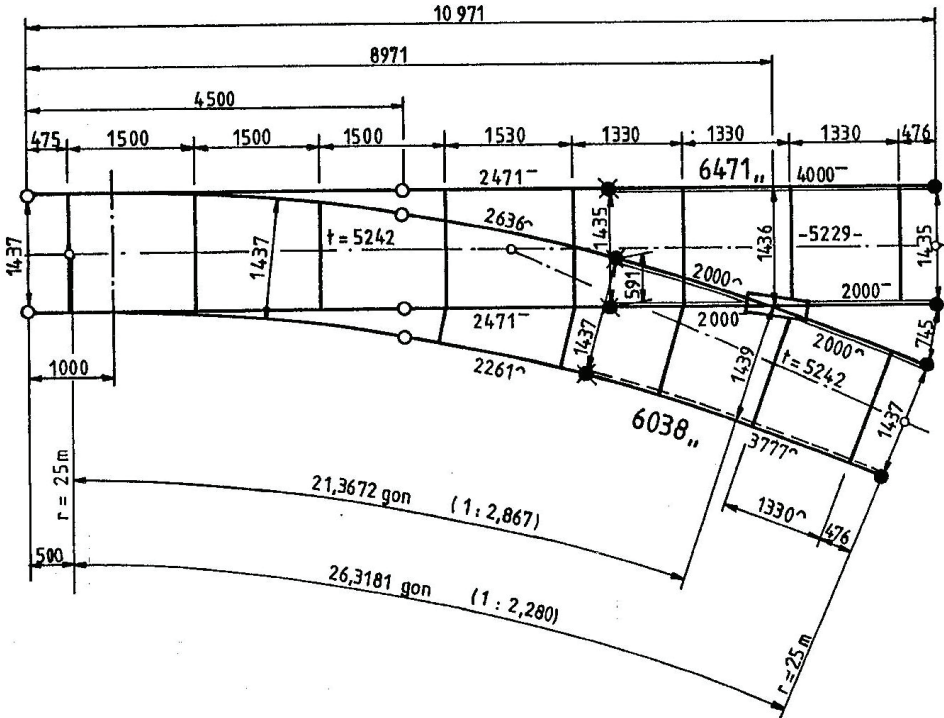
- różnica wysokości toków szynowych bez przechyłki  $\pm 2$  mm;
- wzdłużna różnica wysokości na bazie  $5\text{m} \pm 2$  mm;
- dopuszczalna maksymalna różnica rozstawu torów od wartości nominalnej 10 mm na prostej i 30 mm na łukach;
- dokładność strzałki  $\pm 5$  mm na bazie pomiarowej 4m.

W przepisach amerykańskich [6] i australijskich [7] pojawiają się również inne parametry istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu, takie jak minimalny promień łuku 25 m, czy też maksymalna prędkość pociągu tramwajowego na łuku mniejszym niż 100 m – 15 m/h.

Istotnym ze względów bezpieczeństwa eksploatacji torowisk tramwajowych jest także konstrukcja krzyżownic w rozjazdach tramwajowych. W polskich normach zalecana jest krzyżownica monoblokowa z rowkiem o przekroju prostokątnym. Głębokość rowka na skrzyżowaniach powinna wynosić 10-12 mm, w celu zapewnienia toczenia się koła obrzeżami obręczy po powierzchniach płytkich rowków krzyżownic. Jak jednak wiadomo – w przypadku szybkiego zużycia – koło przestaje realizować jazdę obrzeżem, nie spełniając podstawowego założenia tej konstrukcji. Konieczne jest zatem stosowanie stali najwyższej wytrzymałości [7], a w niektórych przypadkach zasadne byłoby wykorzystanie krzyżownic głęboko rowkowych [4]. Takich wytycznych brakuje obecnie w polskich przepisach, a to może w znaczący sposób wpływać na jakość realizowanych modernizacji oraz bezpieczeństwo.

Kluczowe znaczenie w aspekcie bezpiecznej eksploatacji węzłów tramwajowych ma ich geometria. Poniżej zamieszczono rysunek oraz wytyczne w zakresie projektowania i wykonania drogi rozjazdowej w łuku o promieniu 25 m. Należy zwrócić uwagę na powiększoną szerokość toru w łuku rozjazdu  $+2$  mm oraz w elemencie krzyżownicy  $+4$  mm.

Po wykonaniu skrzyżowania odbiór odbywa się zgodnie z protokołem udostępnionym w przepisach [4]. Maksymalne odchylenia podane są tam w tabelach pomiarowych. W aspekcie analizy problematycznego elementu, jakim jest krzyżownica, odchylenie od wymaganej szerokości toru w krzyżownicy 1439 mm nie może przekraczać  $-0$  mm/  $+3$  mm.



Rys. 1. Geometria skrzyżowania – rozjazd R25

### 3. Obiekt badań i metodologia pomiaru

Badania w zakresie prawidłowości geometrycznej oraz jakości wykonania podstawowych elementów skrzyżowania realizowane były w węźle Basztowa – Długa w Krakowie. Skrzyżowanie to razem z modernizowanym torowiskiem w ulicy Długiej zostało oddane do eksploatacji w sierpniu 2010 roku. Badania przeprowadzono pod kątem bezpieczeństwa ruchu pociągów tramwajowych. Były to pomiary parametrów geometrycznych węzła (szerokość toru, przechyłka, niwelacja i wichrowatość), a także badanie krzyżownic, mające na celu określenie szerokości toru, jego profilu, oraz twardości materiału. Badaniom poddano następujące kierunki (rys. 2):

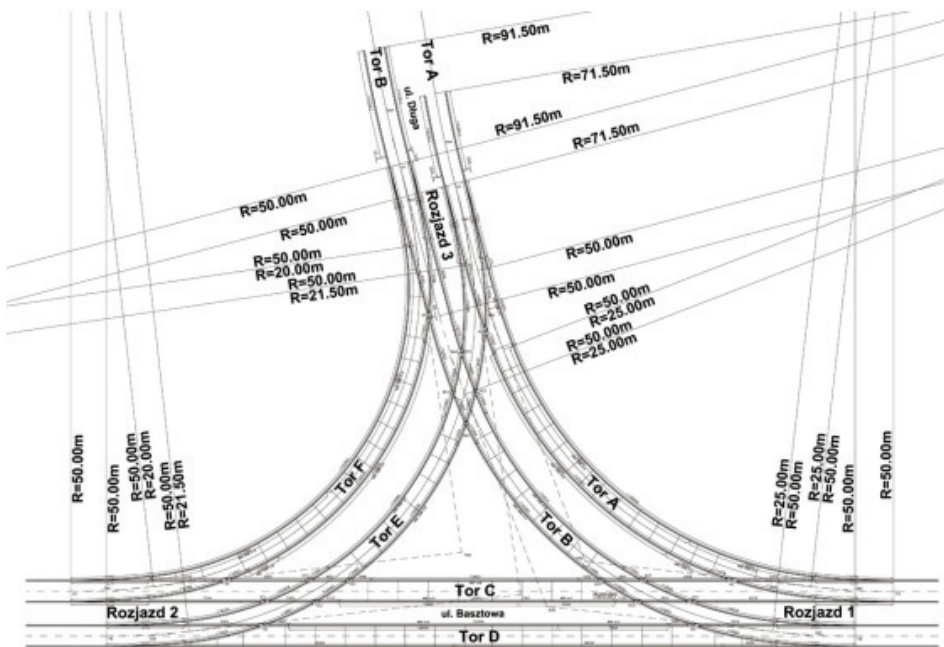
- prosta Dworzec Główny – Teatr Bagatela,
- prosta Teatr Bagatela – Dworzec Główny,
- łuk Teatr Bagatela – ul. Długa o promieniu  $R=21.5$  m,
- łuk ul. Długa – Teatr Bagatela o promieniu  $R=20.0$  m,
- łuk Dworzec Główny – ul. Długa, o promieniu  $R=25.0$  m,

- łuk ul. Długa – Dworzec Główny, o promieniu  $R=25.0$  m.

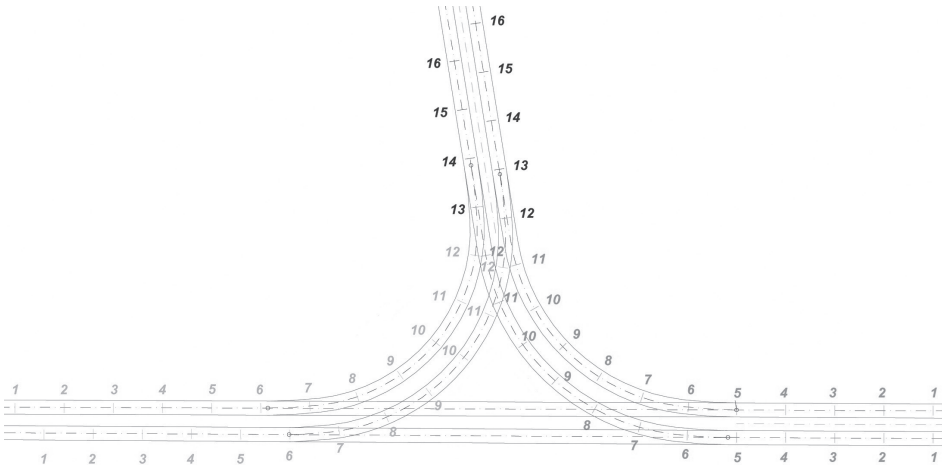
Punkty pomiarowe rozmieszczone zostały co 5 m (rys. 3, 4). W tych punktach wykonano pomiary szerokości toru, oraz przechyłki toru. Badania wykonano toromierzem ręcznym z dokładnością do 1 mm. Wykonano niwelację torów i na jej podstawie obliczono wichrowatość na bazie 5 m. Uzyskane wyniki przechyłek z pomiaru toromierzem i z niwelacji porównano. Dodatkowo wykonano pomiary strzałek co 2,5 m dla wewnętrznego toku każdego łuku.

Badaniom poddano również krzyżownice. Wykonano cztery profile na każdej krzyżownicy, gdzie dodatkowo zmierzono prześwit toru. Profile krzyżownic wykonano w odstępach 25 cm i 50 cm od dzioba krzyżownicy – 4 pomiary dla każdej krzyżownicy. Zastosowano profilomierz GRAW XY, o dokładności 0,1 mm.

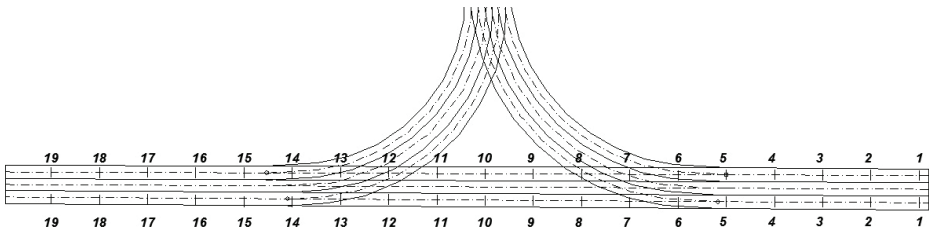
Pomiary krzyżownic uzupełniono o pomiar twardości materiału. Wykonane zostało osiem pomiarów dla każdej krzyżownicy. Pomiary zostały wykonane przy użyciu elektronicznego twardościomierza, a wyniki zostały podane w skali twardości Brinella (HB).



**Rys. 2. Schemat układu torowego węzła. Źródło: KZN Bieżanów**



**Rys. 3. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na łukach**



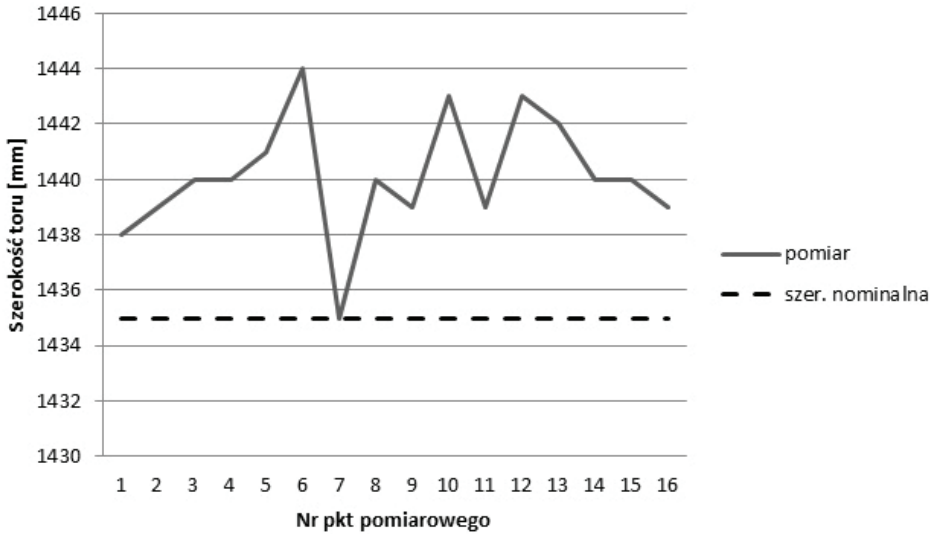
**Rys. 4. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na prostych**

#### 4. Pomiar szerokości toru

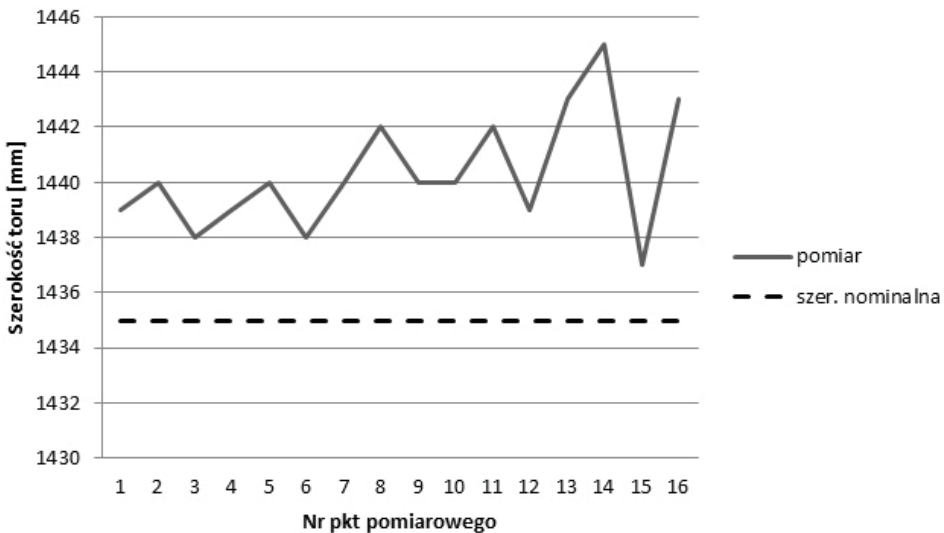
Pomiar szerokości torów wykonano toromierzem ręcznym. Na wykresach poniżej (rys. 5,6) przedstawiono pomierzone szerokości torów w stosunku do szerokości nominalnych dla wybranych odcinków.

Obserwuje się stosunkowo wysokie odchylenia szerokości toru od wartości nominalnej. Maksymalna różnica szerokości pomiędzy wartością pomierzoną, a nominalną wynosi 9 mm na bazie 5 m, na łuku Teatr Bagatela - ul. Długa. Zaobserwowane, sporadyczne odchylenia od wartości dopuszczalnej, nie wpływają znacząco na bezpieczeństwo poruszającego się pociągu tramwajowego. Jednak jak każde niedokładności w wykonaniu obniżają trwałość konstrukcji, sprzyjają zwiększonej niestabilności jazdy oraz mogą wpłynąć na powiększone zużycie. Zaobserwowane niedokładności geometrii torowiska zgodnie z obowiązującymi przepisami są dopuszczalne, jednak z racjonalnego

punktu widzenia, należy dążyć do wyższej jakości robót modernizacyjnych. Do uzyskania takiej sytuacji niezbędne jest jednak wprowadzenie szczegółowych, jasnych i wymagających przepisów gwarantujących najwyższą jakość i bezpieczeństwo.



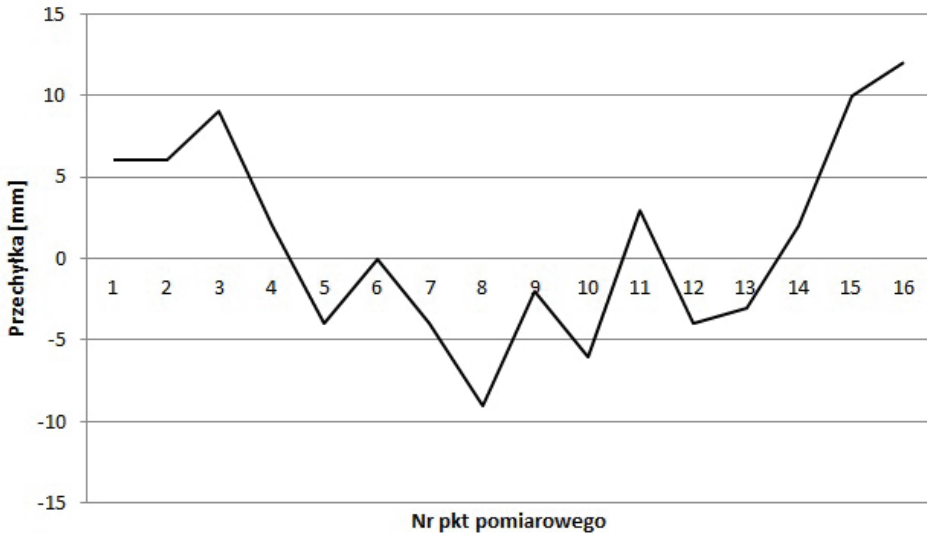
**Rys. 5. Szerokość toru na zewnętrznym łuku Teatr Bagatela- ul Długa o promieniu  $R=21,5$  m**



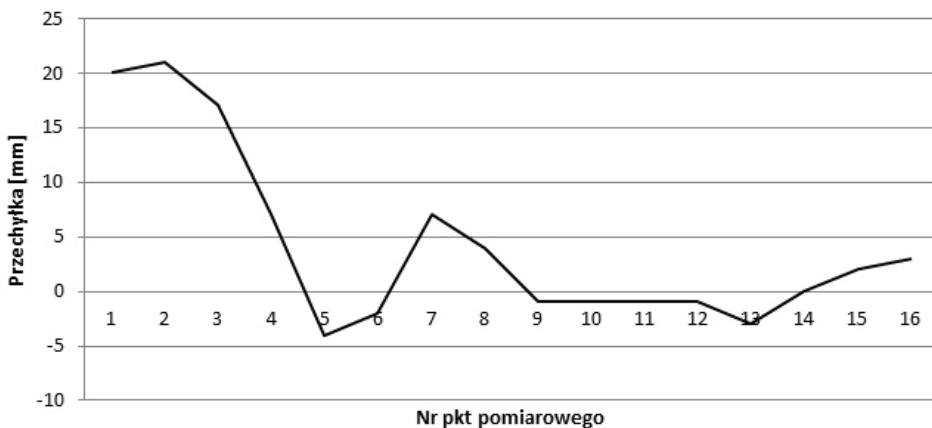
**Rys. 6. Szerokość toru na wewnętrznym łuku ul Długa- Teatr Bagatela o promieniu  $R=20,0$  m**

## 5. Pomiar przechyłki

Pomiary przechyłek wykonane zostały toromierzem, a także zostały wyliczone jako wynik niwelacji geometrycznej. Wyniki pomiarów porównano i uzyskano zgodność pomiędzy nimi. Przetstawione poniżej wykresy (rys. 7, 8) przedstawiają wyniki dla wybranych kierunków. Wartości ujemne przechyłek na przedstawionych poniżej wykresach oznaczają zaniżenie toku wewnętrznego od osi międzytorza.



**Rys. 7. Przechyłka toru łuku ul. Długa-Teatr Bagatela o promieniu  $R=21,5$  m**



**Rys. 8. Przechyłka toru łuku ul. Długa-Dworzec Główny o promieniu  $R=25.0$  m**

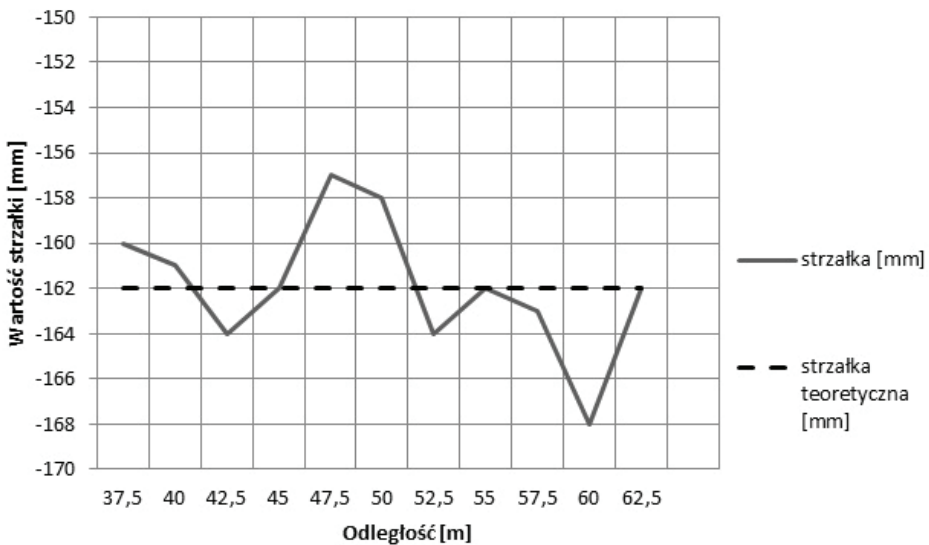


## 6. Pomiar krzywizny układu torowego

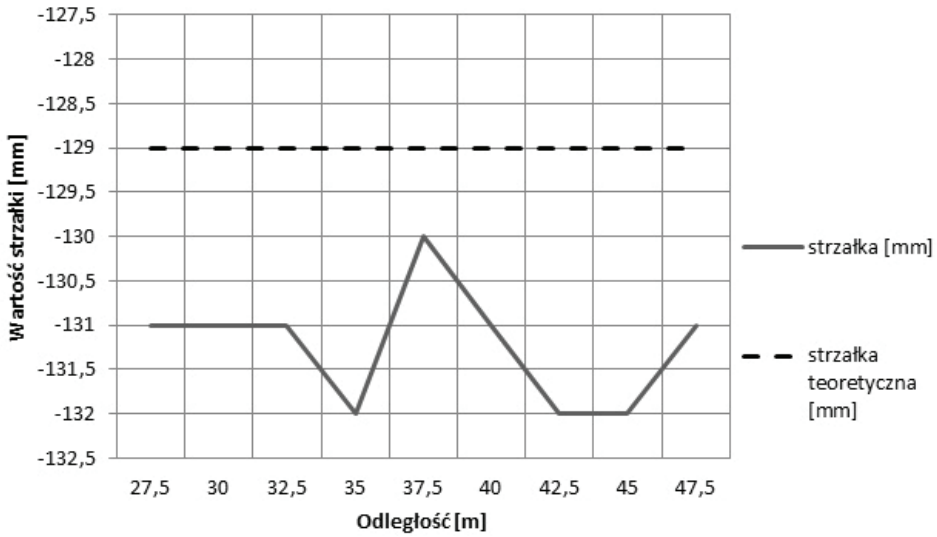
Wykonano pomiary strzałek na czterech łukach kołowych badanego skrzyżowania. Pomiary wykonywano dla szyny wewnętrznej danego łuku. Punkty pomiarowe zagęszczono, tak aby pomiary wykonywane były w odstępach co 2,5 m, na bazie o długości 5 m.

Dla łuku o promieniu  $R=20,0$  m teoretyczna wartość strzałki wynosi 162 mm, a dla łuku o promieniu  $R=25,0$  m – 129 mm. Na wykresach poniżej (rys. 9, 10) przedstawiono porównanie strzałek pomierzonych z wartościami teoretycznymi.

Pomiary stwierdziły również niedokładności w kształtowaniu łuków kołowych – maksymalna różnica strzałki teoretycznej od pomierzonej 6 mm na łuku o promieniu 20 m. Wartość zaobserwowanej niedokładności nie wpływa na bezpieczeństwo, jednak może skutkować obniżeniem trwałości nawierzchni.

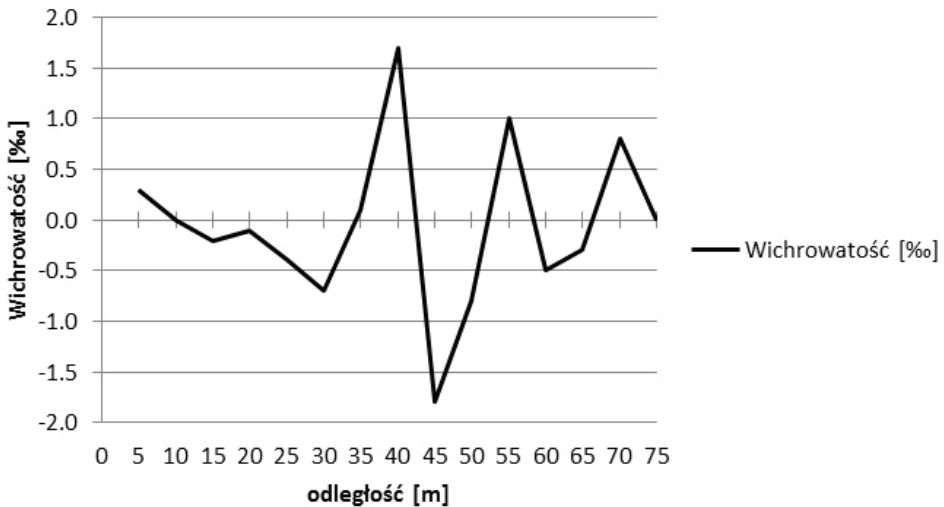


**Rys. 9. Wartość strzałek na łuku ul. Długa – Teatr Bagatela o promieniu  $R=20,0$  m**



**Rys. 10. Wartość strzałek na łuku Dworzec Główny- ul. Długa o promieniu  $R=25,0$  m**

## 7. Niwelacja węzła i wichrowatość



**Rys. 11. Wartość wichrowatości na łuku ul. Długa- Teatr Bagatela o promieniu  $R=20,0$  m**

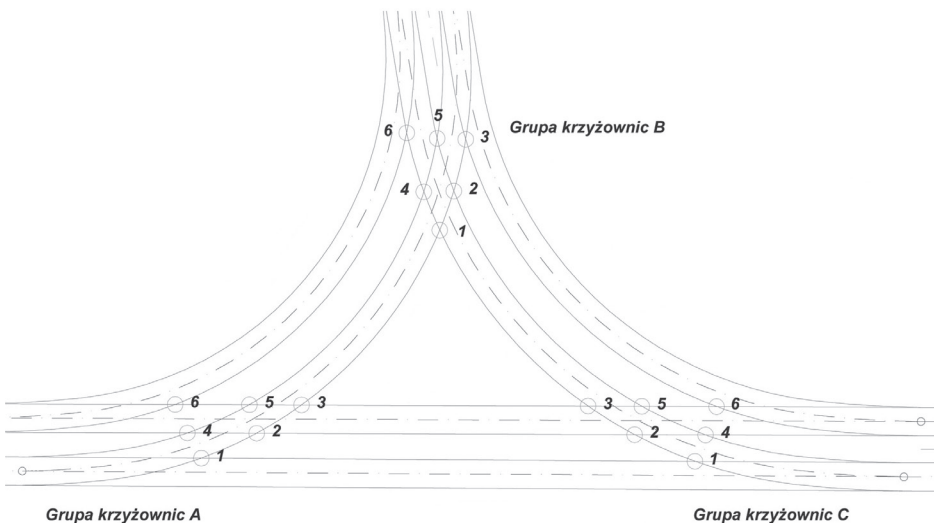
Niwelacja została wykonana na łukach i na odcinku prostym mierzonego węzła. Punkty pomiarowe rozmieszczone były co 5 m. Na podstawie tych pomiarów policzone zostały wysokości szyn w lokalnym

układzie współrzędnych. Wykonano obliczenia wichrowatości torów. Na rysunku 11 przedstawiono wykres wichrowatości torów dla odcinka ul. Długa – Teatr Bagatela. Podobnie, jak dla innych torów zauważono wysoką wichrowatość, sięgającą na poniżej przedstawionym odcinku nawet 1,8‰. Niepokojąca jest tu duża zmienność wichrowatości na długości mierzonego odcinka – sytuacja ta przekłada się na niespokojność jazdy – negatywnie wpływając na komfort podróży.

## 8. Pomiar przekrojów krzyżownic w węźle

Przeprowadzone badania miały odpowiedzieć również na pytanie dotyczące nieprawidłowego ruchu pociągów tramwajowych po oddaniu do eksploatacji modernizowanego torowiska. W początkowym okresie eksploatacji zdarzały się bowiem wykolejenia – obserwowane podczas przejazdu kół obrzeżem przez krzyżownice.

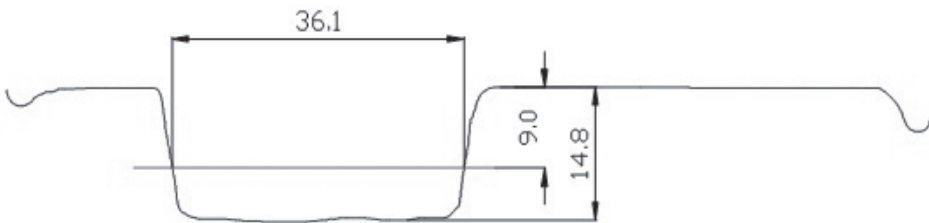
W mierzonym węźle występuje 18 krzyżownic płytko rowkowych. Dla każdej z nich wykonano po cztery przekroje (łącznie 72 przekroje). Zostały one wykonane w odległościach 25 cm i 50 cm od dzioba krzyżownicy. Schemat położenia i oznaczenia krzyżownic przedstawiony został na rysunku 12.



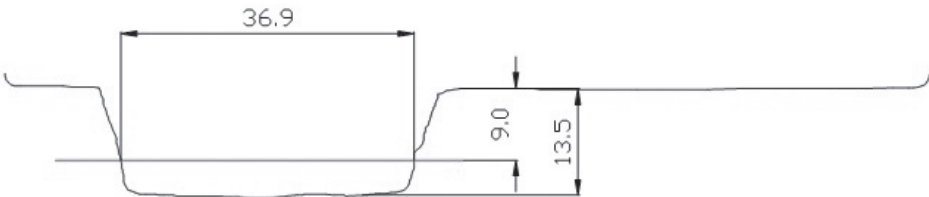
**Rys. 12. Schemat pomiaru krzyżownic w węźle**

Poniżej przedstawiono przekroje (rys. 13, 14, 15, 16) w pierwszej krzyżownicy w grupie A, w toku zewnętrznym na łuku Teatr Bagatela-ul. Długa.

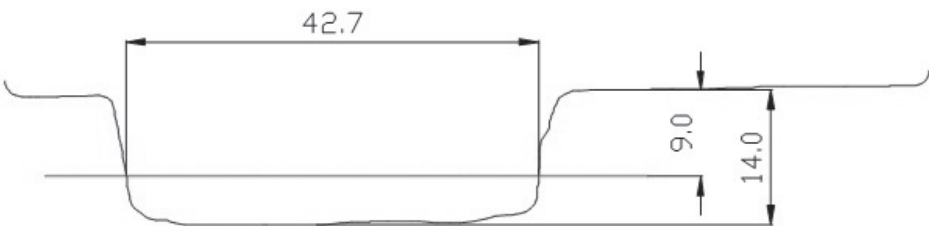
Zauważalne jest znaczne poszerzenie rowka w drugiej części krzyżownicy. Poszerzenie to zostało wykonane po kilkukrotnym zdarzeniu wykolejenia wózków tramwaju. Dzięki takiemu zabiegowi poprawiło się wpasowanie kół w skrzyżowanie, a tym samym bezpieczeństwo jazdy na tym odcinku. Sytuacja ta potwierdza konieczność stosowania poszerzenia od wartości nominalnej toru 1435 mm w skrzyżowaniach torów – można się tu oprzeć na wytycznych [4] oraz wymaganiach dotyczących geometrii skrzyżowań (rys. 1.)



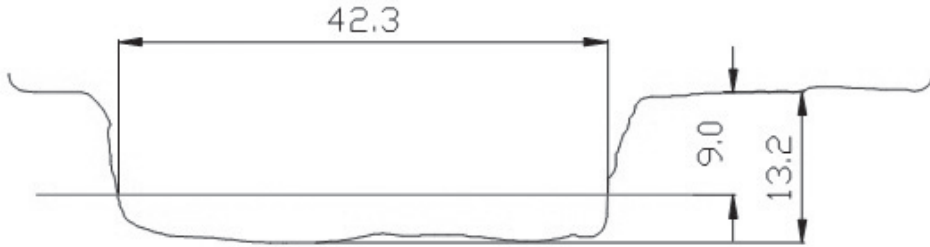
**Rys. 13. Krzyżownica A1 w przekroju nr 1**



**Rys. 14. Krzyżownica A1 w przekroju nr 2**



**Rys. 15. Krzyżownica A1 w przekroju nr 3**



**Rys. 16. Krzyżownica A1 w przekroju nr 4**

### **9. Pomiar twardości w krzyżownicach**

Pomiary twardości w krzyżownicach wykonano dla każdej z trzech grup oznaczonych na rysunku 11. W każdym punkcie wykonano osiem pomiarów przy użyciu elektronicznego twardościomierza, a wyniki zostały podane w skali twardości Brinella (HB).

Obliczono średnią twardość ze wszystkich pomiarów krzyżownic i jej odchylenie standardowe. Otrzymano wynik:  $354 \text{ HB} \pm 47 \text{ HB}$ . Maksymalna pomierzona twardość wyniosła 467 HB, a minimalna 190 HB. Wyniki tych pomiarów pokazują niepokojąco duży rozrzut twardości krzyżownic.

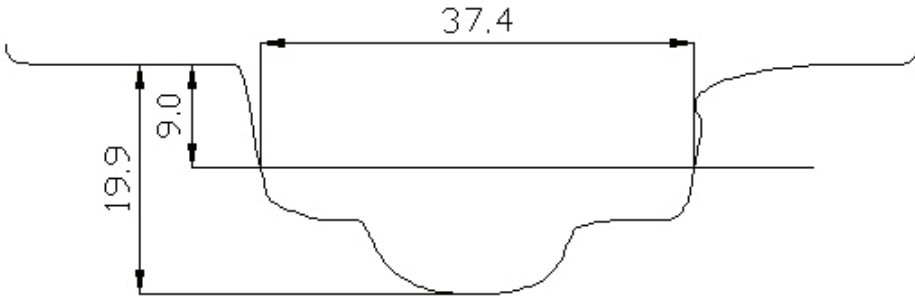
Badania przeprowadzone w 2006 roku przez Politechnikę Krakowską dotyczące zużycia szyn w torowiskach tramwajowych [8] wykazały średnią twardość kół tramwajowych na poziomie 377 HB z odchyleniem standardowym 14,2 HB.

Na podstawie tych obserwacji stosunek średniej twardości kół taboru do średniej twardości krzyżownic wynosi 1,1. Obowiązujące przepisy nie określają minimalnej twardości krzyżownic, jednak z uwagi na bardzo niekorzystną sytuację jazdy obrzeżem koła – krzyżownice powinny cechować najwyższą możliwą twardość.

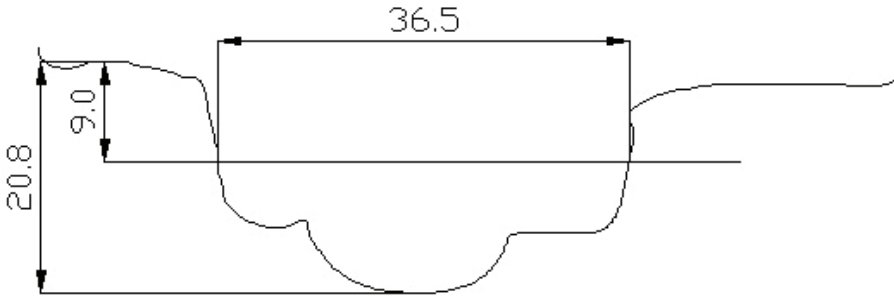
Niedopuszczalne jest sytuacja, gdy średnia twardość elementu krzyżownicy jest mniejsza od średniej twardości kół taboru. W takim wypadku następuje bardzo szybkie uplastycznianie stali krzyżownicy, a element z uwagi na kontakt powierzchni tocznej koła z krzyżownicą przestaje spełniać swoją funkcję.

Szybkie uplastycznienie krzyżownic można zaobserwować na badanym skrzyżowaniu w miejscu jazdy na wprost ulicą Basztową. Ry-

sunki 17, 18 pokazują maksymalne zaobserwowane zużycie, w którym pogłębienie rowka osiąga wartość 20 mm, co oznacza kontakt powierzchni toczonej koła – niepożądany dla tego typu konstrukcji.



**Rys. 17. Krzyżownica A1 (jazda na wprost) przekrój nr 4**



**Rys. 18. Krzyżownica A1 (jazda na wprost) przekrój nr 5**

## 10. Wnioski z przeprowadzonych badań

Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano liczne niedokładności geometrii węzła. Większe przekroczenia wartości dopuszczalnych występują jednak sporadycznie i obecnie nie wpływają na bezpieczeństwo ruchu pojazdów tramwajowych. Sytuacja ta, choć niepożądana z punktu widzenia wysokiej jakości oraz trwałości nawierzchni odpowiada obowiązującym przepisom.

Jak pokazano, stosowanie krzyżownic płytko rowkowych wiąże się z dużymi problemami eksploatacyjnymi. Geometria krzyżownic w połączeniu ze zbyt małą szerokością toru w skrzyżowaniu o małym promieniu – może skutkować wykolejeniem pojazdu szynowego. Należy dążyć do jak najszybszego uregulowania przepisów w tym zakresie. Dodatkowo, zbyt duży rozrzut twardości krzyżownic może powodować w nie-

których przypadkach bardzo szybkie uplastycznienie stali, co skutkuje niepożądanym kontaktem powierzchni toczonej z krzyżownicą.

Reasumując, brak szczegółowych przepisów i wytycznych znacząco wpływa na obniżenie jakości oraz trwałość niezwykle kosztownych modernizacji. Może również wpływać na bezpieczeństwo i niezawodność komunikacji tramwajowej.

## **Bibliografia**

- [1] Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych - MAGTiOŚ 1983.
- [2] PN-K-92008/Ap1: 1999 Komunikacja miejska: skrajnia kinematyczna wagonów tramwajowych.
- [3] PN-K-92011:1998 Torowiska tramwajowe: wymagania i badania.
- [4] VDV-Schrift 600: Oberbau-Richtlinien und Oberbau-Zusatzrichtlinien (OR/ OR-Z) des VDV für Bachnen nach der BOS-trab, Niemcy 1995.
- [5] Technische Regeln für die Spurführung von Schienenbahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab), Niemcy 2006.
- [6] Track Design Handbook for Ligot Rail Transit. Transportation Research Bard, Stany Zjednoczone 2000.
- [7] Tram Track Design Guidelines. Yarra Trams. Australia 2003.
- [8] Czyczyła W., Stawowiak J., Lisowski S.: *Określenie metodologii badań zużycia szyn w torowiskach tramwajowych Krakowa*. Kraków 2006 (praca na zlecenie ZDiK UM Kraków).

## **ASSESSMENT OF GEOMETRICAL ACCURACY AND CONSTRUCTION QUALITY OF TRAM JUNCTION, ON THE BASIS OF CARRIED OUT STUDIES**

### **Summary**

*The paper presents the results and analysis of the geometrical parameters of the Basztowa street and the Długa street tramway intersection in Krakow. The reference to the requirements of Polish and foreign standards of shaping the tramway intersections*

*have been made together with the review of design solutions. This paper presents analysis of the safety problems associated with the operation of tramway intersection. The directions of improving the structure and the rules of tramway switches have been indicated.*

**Keywords:** *tramway track; track structure; tramway frog, track geometry, tramway intersection, tramway switch*