

TRAMWAJE DWUSYSTEMOWE W WYBRANYCH MIASTACH NIEMIECKICH

Streszczenie

Artykuł opisuje historię powstawania oraz aktualnie istniejące sieci tramwajów dwusystemowych w niemieckich miastach Saarbrücken, Kassel, Zwickau i Chemnitz. Jest on kontynuacją artykułów na ten temat tramwaju dwusystemowego w Karlsruhe, gdzie po raz pierwszy zastosowano to rozwiązanie. Tramwaj dwusystemowy (ang. „tram-train”) jest to system pasażerskiego transportu publicznego łączący w sobie właściwości w zakresie infrastruktury, taboru oraz zasad organizacji przewozów dwóch podsystemów dróg szynowych: kolejowego i tramwajowego. Głównym powodem powstania tramwaju dwusystemowego było usprawnienie obsługi komunikacyjnej stref podmiejskich i całego regionu poprzez stworzenie systemu bezpośrednich połączeń z przedmieść i okolicznych mniejszych miejscowości do centrum miasta bez konieczności dokonania przesiadki. Równie istotnym powodem było dążenie do racjonalizacji wykorzystania istniejącej w regionie infrastruktury szynowej - przewozy tramwajami dwusystemowymi generują mniejsze koszty niż klasycznym taborom kolejowym, a oszczędności można spożytkować na zwiększenie częstotliwości przewozów.

WSTĘP

Rzeczony tramwaj dwusystemowy wpisuje się w obserwowany obecnie korzystny trend dynamicznej ekspansji systemów tramwajowych zarówno tych tradycyjnych jak i innowacyjnych oraz niekonwencjonalnych. W najbardziej znanym rozwiązaniu tramwaju dwusystemowego – tzw. „Modelu Karlsruhe” (szerzej opisanym w pracach [11 i 12]) odpowiednio dostosowany szynowy pojazd może poruszać się po torach tramwajowych (na obszarze miasta) oraz po torach kolejowych (na odcinkach podmiejskich i w okolicznym regionie). Początkowo tramwaje dwusystemowe rozwijały się głównie w miastach niemieckich: Karlsruhe, Saarbrücken, Kassel, Zwickau, Chemnitz, Heilbronn i Nordhausen [10]. Na fali powrotu systemów tramwajowych we francuskich miastach system ten powstał także w Paryżu [6] i Miluzie. System ten istnieje także w hiszpańskim mieście Alicante. Analizy mające na celu implementację tramwaju dwusystemowego były przygotowywane dla Krakowa [4], Łodzi [19], Wrocławia [9] i Warszawy.

Tramwaj dwusystemowy (ang. „tram-train”) jest to system pasażerskiego transportu publicznego łączący w sobie właściwości w zakresie infrastruktury, taboru oraz zasad organizacji przewozów dwóch podsystemów dróg szynowych: kolejowego i tramwajowego. Warto wspomnieć, że rozwiązania techniczne w zakresie infrastruktury i taboru istotnie się różnią w dwóch podsystemach dróg szynowych: kolei i tramwaju – szczególnie wyraźnie widać te różnice w odniesieniu do: rozjazdów i skrzyżowań torów, profili kół pojazdów, skrajni budowli i taboru, ukształtowania peronów oraz wymagań dotyczących wytrzymałości pojazdu w sytuacji zderzenia. Specyfika organizacyjna związana z systemami sterowania ruchem i kontroli ruchu oraz systemami zasilania trakcyjnego jest także odmienna dla tych dwóch podsystemów. Różnice te na etapie wdrażania tramwajów dwusystemowych w Karlsruhe powodowały powstawanie różnorodnych problemów, które aktualnie posiadają już swoje rozwiązania.

1. TRAMWAJ DWUSYSTEMOWY W SAARBRÜCKEN

W niemieckim mieście Saarbrücken w 1965 roku została zlikwidowana sieć tramwajowa. 24 października 1997 roku rozpoczął kursowanie pomiędzy przygranicznymi miastami Saarbrücken (Niemcy) i Sarreguemines (Francja – departament Lotaryngia) transgraniczny tramwaj dwusystemowy spółki „Saarbahn”. Trasa początkowo łą-

czyła tylko miejscowość Saarbrücken z Sarreguemines i miała długość 18 km, z czego 13 km pociągi pokonywały po linii kolejowej (DB Netz AG) i 5 km po nowo wybudowanym torowisku tramwajowym w Saarbrücken.

Użyty tramwaj dwusystemowy (ośmioosiowy wagon dwukierunkowy) jest pojazdem typu kolejowego z napędem elektrycznym, który porusza się po torach kolejowych i wzmocnionych torowiskach tramwajowych (zbliżonych parametrami do torów kolejowych ze względu na „kolejowe” naciski osi). Trójczłonowe tramwaje dwusystemowe o długości 37,0 m i szerokości 2,65 m mogą osiągnąć prędkość maksymalną 100 km/h, ale w obszarze centrum miasta poruszają się z prędkościami do 50 km/h i według przepisów tramwajowych. Pierwsze tramwaje dwusystemowe w Saarbrücken były w ok. 50 % niskopodłogowe (wysokość podłogi w okolicach drzwi względem PGS wynosiła 400 mm) [5]. W tramwajach zastosowano chowany stopień, którego położenie względem PGS (płaszczyzny główki szyn) można regulować w zakresie 0,38 – 0,55 m, co ułatwia wsiadanie pasażerem z peronów o różnej wysokości oraz kompensuje różnice pomiędzy kolejową skrajnią budowli, i skrajnią budowli tramwaju dwusystemowego na odcinkach linii kolejowych.

W kolejnych latach sieć tramwaju dwusystemowego była rozbudowywana na północ od Saarbrücken przy wykorzystaniu nieczynnej linii kolejowej DB, aby 5 października 2014 r. dotrzeć do miejscowości Lebach/Jabach i osiągnąć długość 44 km. Poszczególne odcinki sieci „Saarbahn” w okolicach Saarbrücken wraz z datami otwarcia przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Poszczególne odcinki sieci „Saarbahn” wraz z datami otwarcia - opracowanie własne na podstawie danych z [14]

Rok otwarcia	Połączone odcinki sieci Saarbahn
1997	Sarreguemines - Ludwigstraße
1999	Ludwigstraße - Cottbuser Platz
2000	Cottbuser Platz - Siedlerheim
2001	Siedlerheim - Riegelsberg Süd
2009	Riegelsberg Süd - Etzenhofen
2011	Etzenhofen - Heusweiler Markt
2014	Inbetriebnahme Heusweiler Markt - Lebach/Jabach

Aktualny schemat sieci „Saarbahn” w okolicach Saarbrücken pokazano na rysunku 1. Pojazdy dwusystemowe sieci „Saarbahn” przewożą ok. 10 - 12 mln pasażerów rocznie, a spodziewano się, że po otwarciu przedłużenia do Lebach ich liczba wzrośnie o kolejne 1-2

mln [13]. Tramwaj dwusystemowy FLEXITY Link firmy Bombardier podczas uroczystości otwarcia przedłużenia sieci „Saarbahn” do Lebach pokazano na rysunku 2. Tramwaj dwusystemowy na sieci „Saarbahn” przy peronie przystanku Riegelsberg Süd, który umożliwia przesiadkę pasażerom na autobus w systemie „drzwi w drzwi” pokazano na rysunku 3.



Rys. 1. Schemat sieci „Saarbahn” w okolicach Saarbrücken [14]



Rys. 2. Tramwaj dwusystemowy FLEXITY Link firmy Bombardier podczas uroczystości otwarcia przedłużenia sieci „Saarbahn” do Lebach [13]



Rys. 3. Tramwaj dwusystemowy na sieci „Saarbahn” przy peronie przystanku Riegelsberg Süd, który umożliwia przesiadkę pasażerom na autobus w systemie „drzwi w drzwi” [23].

2. TRAMWAJ DWUSYSTEMOWY W KASSEL

W niemieckim mieście Kassel zastosowano dwa różne sposoby połączenia systemu kolejowego i tramwajowego. Pierwszy z nich został wdrożony na odcinku dawnej jednotorowej kolei dojazdowej prowadzącej z Kassel Hbf do Hessisch Lichtenau, która od 1985 była wykorzystywana jedynie do przewozów towarowych. W latach 1997 – 2001 zmodernizowano tę linię i zelektryfikowano napięciem tramwajowym (600 V prądu stałego). Dodatkowo w celu umożliwienia dalszego wykorzystywania jej przez tabor o skrajni kolejowej przy jednoczesnym wykorzystywaniu przez niskopodłogowe tramwaje o klasycznej tramwajowej skrajni (mniejszej szerokości pudła) w rejonie przystanków zaprojektowano podwójne sploty torowe. Rozwiązanie to umożliwiło klasycznym tramwajom obsługę przystanku, dzięki podjechaniu pod samą krawędź peronu (brak przerwy wynikającej z różnic pomiędzy skrajnią kolejową a tramwajową). Podwójne sploty torowe w rejonie peronów przystankowych na jednotorowej linii Kassel Hbf - Hessisch Lichtenau w Kassel pokazano na rysunku 4. Tramwaj o klasycznych wymiarach szerokości pudła zbliżający się do peronu przystankowego na jednotorowej linii Kassel Hbf - Hessisch Lichtenau w Kassel pokazano na rysunku 5.



Rys. 4. Podwójne sploty torowe w rejonie peronów przystankowych na jednotorowej linii Kassel Hbf - Hessisch Lichtenau w Kassel [8]



Rys. 5. Tramwaj o klasycznych wymiarach szerokości pudła zbliżający się do peronu przystankowego na jednotorowej linii Kassel Hbf - Hessisch Lichtenau w Kassel [8]

Drugi sposób zastosowany w Kassel polega na wprowadzeniu do ruchu tramwajów dwusystemowych przystosowanych do poruszania się zarówno po sieci kolejowej jak i tramwajowej. W Kassel zdecydowano się na zakup 28 tramwajów dwusystemowych serii Regio-Citadis (w tym część hybrydowych) od firmy Alstom, które otrzymały nazwę RegioTram. Pojazdy te mają standardową dla tramwajów dwusystemowych szerokość pudła – 2,65 m, a ich długość wynosi 36,76 m. Są niskopodłogowe w 75 % i zdolne do rozwinięcia maksymalnej prędkości 100 km/h. Dwusystemowy tramwaj RegioCitadis firmy Alstom poruszający się po torowiskach tramwajowych na ulicach Kassel pokazano na rysunku 6.



Rys. 6. Dwusystemowy tramwaj RegioCitadis firmy Alstom poruszający się po torowiskach tramwajowych na ulicach Kassel [8]

Aktualnie w rejonie Kassel funkcjonują 4 linie RegioTram o numerach 3, 4, 5 i 9 na następujących trasach:

- RT3 Kassel–Hofgeismar-Hümme (29 km),
- RT4 Wolfhagen–Kassel (30 km),
- RT5 Melsungen–Kassel (31 km),
- RT9 Schwalmstadt-Treysa–Kassel (55 km).

Sieć tramwaju dwusystemowego – RegioTram w rejonie Kassel została pokazana na rysunku 7.



Rys. 7. Sieć tramwaju dwusystemowego – RegioTram w rejonie Kassel [15]

Nieelektryfikowana trasa RT 4 do Wolfhagen jest obsługiwana przez hybrydowe spalinowo-elektryczne pojazdy dwusystemowe RegioCitadis (10 szt.). Tramwaj dwusystemowy hybrydowy (o napędzie spalinowo-elektrycznym) serii RegioCitadis zatrzymujący się przy peronie przystankowym na nieelektryfikowanej linii RT 4 do Wolfhagen w rejonie Kassel pokazano na rysunku 8. Pozostałe trasy

są obsługiwane przez elektryczne pojazdy dwusystemowe RegioCitadis (18 szt.) przystosowane do tramwajowego systemu zasilania (600 V prądu stałego) i kolejowego (15 kV prądu przemiennego 16 2/3 Hz). W celu rozbudowy sieci RegioTram o 122 km tras należało dobudować jedynie ok. 10 km torów – głównie łączących istniejące linie kolejowe podmiejskie z istniejącymi torowiskami tramwajowymi w Kassel.



Rys. 8. Tramwaj dwusystemowy hybrydowy (o napędzie spalinowo-elektrycznym) serii RegioCitadis zatrzymujący się przy peronie przystankowym na nieelektryfikowanej linii RT 4 do Wolfhagen w rejonie Kassel [15]

Dworzec Główny w Kassel - Kassel Hbf znacznie stracił na znaczeniu już w roku 1991, kiedy to otworzono dworzec Kassel-Wilhelmshöhe, który zapewnił miastu obsługę pociągów kolei dużych prędkości oraz pociągów dalekobieżnych. Rola dworca Kassel Hbf została ograniczona głównie do obsługi pociągów regionalnych. Dlatego też zdecydowano o jego przebudowie i od 2007 roku tramwaje dwusystemowe RegioTram korzystają ze stromej rampy położonej w tunelu prowadzącym do jednego z trzech peronów Dworca Głównego Kassel Hbf przeznaczonych dla pojazdów RegioTram, co pokazano na rysunku 9. Perony przeznaczone dla pojazdów RegioTram po modernizacji Dworca Głównego Kassel Hbf pokazano na rysunku 10.



Rys. 9. Tramwaj dwusystemowy RegioTram korzystający ze stromej rampy położonej w tunelu prowadzącym do jednego z trzech peronów Dworca Głównego Kassel Hbf przeznaczonych dla pojazdów RegioTram [7]



Rys. 10. Perony przeznaczone dla pojazdów RegioTram po modernizacji Dworca Głównego Kassel Hbf [7]

3. TRAMWAJ DWUSYSTEMOWY W ZWICKAU

Niemieckie miasto Zwickau przyjęło zupełnie odmienną politykę integracji systemu tramwajowego i kolejowego. W maju 1999 roku w celu zapewnienia możliwości dojazdu bez przesiadki mieszkańcom okolic i przedmieść miasta Zwickau do centrum postanowiono dopuścić lekkie kolejowe pojazdy poruszające się na trasie VL1 na torowiska tramwajowe. Specyficznym dla tego rozwiązania jest fakt wpuszczenia do miasta pojazdu spalinowego – napędzanego za pomocą silnika diesla autobusu szynowego RegioSprinter (producent Siemens AG/DUEWAG). Trasa przebiega od Dworca Głównego w Zwickau – Zwickau (Sachs) Hbf do Zwickau Zentrum wykorzystując starą bocznicę kolejową, a na końcowym odcinku korzysta ze wspólnego torowiska (trójszynowego) z klasycznymi tramwajami. Schemat trasy VL1 (Zwickau Zentrum – Zwickau (Sachs) Hbf – Lengenfeld – Auerbach – Falkenstein – Zwotental – Klingenthal – Kraslice – Sokolov) pociągów regionalnych RegioSprinter wjeżdżających bezpośrednio do centrum miasta Zwickau pokazano na rysunku 11.

Przystanek Zwickau Zentrum jest końcowy dla autobusów szynowych RegioSprinter i przelotowy dla linii tramwajowych, co pokazano na rysunku 12.



Rys. 11. Schemat trasy VL1 (Zwickau Zentrum – Zwickau (Sachs) Hbf – Lengenfeld – Auerbach – Falkenstein – Zwotental – Klingenthal – Kraslice – Sokolov) pociągów regionalnych RegioSprinter wjeżdżających bezpośrednio do centrum miasta Zwickau [17]



Rys. 12. Przystanek Zwickau Zentrum jest końcowy dla autobusów szynowych RegioSprinter i przelotowy dla linii tramwajowych [21]

Na odcinku ok. 1,2 km wykonano przebudowę trasy tramwajowej ze względu na poszerzenie skrajni, gdyż pojazdy RegioSprinter mają szerokość pudła 2,97 m – znacznie szerszą od szerokości pudła klasycznego tramwaju. Dodatkowo wzmocniono konstrukcję torowisk, aby mogła wytrzymać dużo wyższe obciążenia – od lekkich pojazdów kolejowych – autobusów szynowych RegioSprinter. Ze względu na fakt, że w mieście w torowiskach tramwajowych szerokość toru wynosi 1000 mm i różni się od szerokości toru na sieci kolejowej wynoszącej 1435 mm na niektórych odcinkach należało wprowadzić trzecią szynę i skomplikowane układy torowe – w szczególności w rozjazdach. Trójszynowe torowisko w centrum Zwickau zastosowane w celu umożliwienia poruszania się po nim pojazdów szynowych przystosowanych do różnej szerokości toru (1000 mm dla tramwaju i 1435 mm dla autobusu szynowego RegioSprinter) pokazano na rysunku 13. Układ torowy wraz ze skomplikowanymi rozwiązaniami rozjazdów w centrum Zwickau zastosowane w celu umożliwienia poruszania się po nim pojazdów szynowych przystosowanych do różnej szerokości toru (1000 mm dla tramwaju i 1435 mm dla autobusu szynowego RegioSprinter) pokazano na rysunku 14.

Ze względu na znaczną wysokość krawędzi peronów poza miastem, wysokość podłogi w pojazdach RegioSprinter wynosi 58 cm, a w drzwiach wejściowych jest obniżona do 53 cm. Jest to niekorzystne rozwiązanie dla pasażerów korzystających z niskich peronów przystankowych w centrum miasta. Pojazdy RegioSprinter mogące rozwijać prędkość do 120 km/h poza miastem, aby mogły poruszać się w ruchu miejskim posiadają wyposażenie dla typowego tramwaju jak np. kierunkowskazy i podlegają zasadom ruchu tramwajów.



Rys. 13. Trójszynowe torowisko w centrum Zwickau zastosowane w celu umożliwienia poruszania się po nim pojazdów szynowych przystosowanych do różnej szerokości toru (1000 mm dla tramwaju i 1435 mm dla autobusu szynowego RegioSprinter) [22]



Rys. 14. Układ torowy wraz ze skomplikowanymi rozwiązaniami rozjazdów w centrum Zwickau zastosowanymi w celu umożliwienia poruszania się po nim pojazdów szynowych przystosowanych do różnej szerokości toru (1000 mm dla tramwaju i 1435 mm dla autobusu szynowego RegioSprinter) [3]

4. TRAMWAJ DWUSYSTEMOWY W CHEMNITZ

W niemieckim mieście Chemnitz istniały dwa systemy tramwajowe – wąskotorowy i normalnotorowy [9]. W latach 50-tych XX wieku zdecydowano o połączeniu tych systemów poprzez przebudowę istniejących tras wąskotorowych na normalnotorowe i uproszczenie ich przebiegu poprzez skierowanie na ulice o szerszym przekroju. Ze względu na trudności gospodarcze w ówczesnym NRD sieć tramwajowa miasta Chemnitz uległa zmniejszeniu, gdyż nowych i normalnotorowych torowisk zbudowano mniej niż zlikwidowano wąskotorowych.

W latach 90-tych rozpoczęto modernizację sieci tramwajowej poprzez wydłużenie tras i wprowadzenie do użytku nowoczesnego i niskopodłogowego taboru. Zdecydowano także o wykonaniu połączenia miejskiej sieci tramwajowej z siecią kolejową w Altchemnitz, aby uzyskać połączenie z miejscowością Stollberg. Wykorzystano w tym celu istniejącą linię kolejową Würschnitzalbahn (pokazaną na rysunku 15), która zelektryfikowana została napięciem 750 V prądu stałego. Rozwiązanie to jest ciekawe, gdyż istniejąca w Chemnitz sieć tramwajowa jest zelektryfikowana napięciem 600 V prądu stałego.



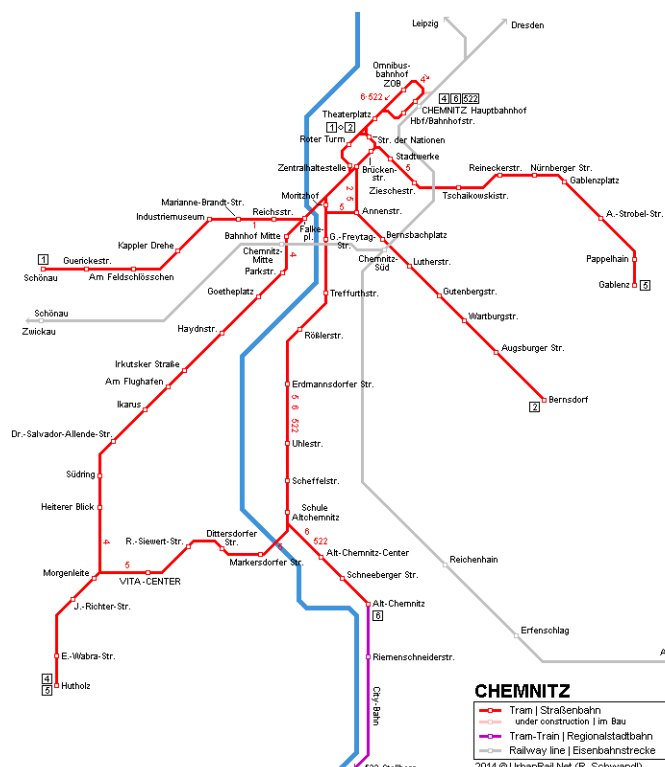
Rys. 15. Linia kolejowa Würschnitzalbahn, której fragment został wykorzystany do połączenia Chemnitz z miejscowością Stollberg za pomocą tramwajów dwusystemowych [20]

Perony na linii do Stollberg zostały przebudowane i wysokość krawędzi peronu względem PGS wynosi 200 mm, co zapewnia możliwość obsługi przez niskopodłogowe tramwaje dwusystemowe. Połączenie pomiędzy Chemnitz i Stollberg oddano do użytku 15 grudnia 2002 roku i jest obsługiwane przez całkowicie niskopodłogowe tramwaje dwusystemowe Variobahn. Pojazdy te posiadają szerokość pułda wynoszącą 2,65 m, długość 31,38 m, prędkość maksymalną 80 km/h i mogą być zasilane prądem stałym o napięciu 600 oraz 750 V. Tramwaj dwusystemowy Variobahn stojący na stacji w Stollberg pokazano na rysunku 16.

W Chemnitz funkcjonuje 5 linii tramwajowych (o numerach 1, 2, 4, 5 i 6) oraz jedna trasa tramwaju dwusystemowego City-Bahn (o numerze 522) do Stollberg współdzielącą trasę z linią tramwajową numer 6 w obrębie Chemnitz oraz wykorzystująca fragment linii kolejowej Würschnitzalbahn od stacji Altchemnitz do Stollberg o długości 16,3 km. Schemat komunikacji szynowej w mieście Chemnitz pokazano na rysunku 17.



Rys. 16. Tramwaj dwusystemowy Variobahn stojący na stacji w Stollberg [1]



Rys. 17. Schemat komunikacji szynowej w mieście Chemnitz [16]

5. Dąbrowski J., *Dwusystemowe tramwaje – czyli tramwaj na torach kolejowych*. Technika Transportu Szynowego 1998, nr 7-8.
6. Drapała A., *Pierwszy tramwaj dwusystemowy we Francji*. Transport Miejski i Regionalny 2007, nr 2.
7. Flickrhivemind.net., <http://flickrhivemind.net/Tags/rbk,tram/Recent>
8. Flickrriver.com., <http://flickrriver.com/photos/tags/steelconstructions/interesting/>
9. Gisterek I., Krużyński M., *Ocena możliwości i zasadności uruchomienia tramwaju dwusystemowego we Wrocławiu*. Transport Miejski i Regionalny 2010, nr 11.
10. Harassek A., *Dwusystemowy tramwaj w Nordhausen*. Technika Transportu Szynowego 2004, nr 6.
11. Kraśkiewicz C., Oleksiewicz W.: *Tramwaj dwusystemowy - moda, czy trend rozwojowy aglomeracyjnego transportu szynowego?*, Logistyka 2015, nr 4.
12. Kraśkiewicz C., Oleksiewicz W.: *Tramwaj dwusystemowy w Karlsruhe*, Logistyka 2015, nr 4.
13. Railwaygazette.com., <http://www.railwaygazette.com/news/urban/single-view/view/saarbahn-reaches-lebach.html>
14. Saarbahn.de., <http://www.saarbahn.de/weiterbau/netzausbau>
15. Streeter T., *A city committed to tram-trains*. Light Rail Transit Association, http://www.lrta.org/TramForward/TAUT_Jan_Tramtrain.pdf
16. Urbanrail.net., <http://www.urbanrail.net/eu/de/c/chemnitz.htm>
17. Vogtlandbahn.de., <http://www.vogtlandbahn.de/de/fahrplan/streckennetz/>
18. Vossloh-kiepe.com., http://www.vossloh-kiepe.com/Rail%20Vehicles/dual-system-vehicles/references/vkprodukt.2014-01-20.8169045412?set_language=en
19. Wesolowski J., *Pociągami przez centrum Łodzi?* Technika Transportu Szynowego 1999, nr 9.
20. Wikipedia.org., http://de.wikipedia.org/wiki/Bahnstrecke_Zw%C3%B6nitz%E2%80%93Chemnitz_S%C3%BCd
21. Wikipedia.org., http://de.wikipedia.org/wiki/Stra%C3%9Fenbahn_Zwickau
22. Wikipedia.org., <http://en.wikipedia.org/wiki/RegioSprinter>
23. Wikipedia.org., <http://en.wikipedia.org/wiki/Saarbahn>

TRAM-TRAINS IN SELECTED GERMAN CITIES

Abstract

The article describes both the construction history of a tram-train network and its current state in the German cities: Saarbrücken, Kassel, Zwickau and Chemnitz. It is an continuation of previous articles concerning tram-train network in Karlsruhe, whereas system was used first time. Tram-train is a works as a public passenger transport system that combines features of infrastructure, rolling stock and rules for organizing both rail and tram subsystems. The main reason for constructing of the tram-train concept was to improve communication services for its suburban areas and the whole region by creating a system of direct connections between the suburbs along with their surrounding smaller villages and the city centre without necessity to change. An equally important reason was to rationalize the use of existing regional rail infrastructure – the tram-train transport generates lower costs than the classic rolling stock and received savings can be spent on increasing the frequency of the service.

Autorzy:

mgr inż. **Cezary Kraśkiewicz** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, Instytut Dróg i Mostów; 00-637 Warszawa, Al. Armii Ludowej 16; e-mail: c.kraskiewicz@il.pw.edu.pl

dr inż. **Wojciech Oleksiewicz** – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, Instytut Dróg i Mostów; 00-637 Warszawa, Al. Armii Ludowej 16; e-mail: w.oleksiewicz@il.pw.edu.pl