

Rozjazdy do dużych prędkości o zmiennej krzywiznie toru zwrotnego

Mirosław Jan Nowakowski

Na PKP rozjazdy o najnowocześniejszych konstrukcjach stosowane są na liniach przeznaczonych do prędkości 200 km/h. Umożliwiają one przejazd po torze zwrotnym z prędkością do 100 km/h. Kolejne duże prędkości stawiają przed konstruktorami rozjazdów jeszcze większe wymagania. Nie są im w stanie sprostać rozjazdy, w których tor zwrotny ma kształt łuku o stałej wartości promienia. W referacie przedstawiono wybrane typy rozjazdów, charakteryzujących się zmienną krzywizną toru zwrotnego.



dr inż.
Mirosław
Jan Nowakowski
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Transportu
Szynowego

Wymagania kolei dużych prędkości

Duże prędkości stawiają rozjazdom wymagania, którym tradycyjne, znane i stosowane od lat konstrukcje nie są w stanie sprostać. Powaga problemu została w Polsce dostrzeżona już kilka lat temu, o czym świadczą m. in. badania eksploatacyjne prowadzone na CMK, przedstawione w [3]. Badania dotyczyły rozjazdów UIC60-1200-1:18,5 z ruchomymi dziobami krzyżownic kilku producentów. Wszystkie te rozjazdy umożliwiają bezpieczną jazdę po torze zasadniczym z prędkością 200 km/h.

Prowadzone obecnie prace modernizacyjne dostosowujące niektóre linie do prędkości 200 km/h (oraz 250 km/h dla pociągów z wychylnym pudłem wagonu), jak również projekt linii „Y”, stawiają rozjazdom jeszcze większe wymagania. Najważniejsze z nich to dopuszczalna prędkość podczas przejazdu przez tor zwrotny rozjazdu. Jeżeli przyjmiemy, że zależność między prędkością maksymalną na linii V_p a prędkością przejazdu przez tor zwrotny rozjazdu V_{zwr} w torach szlakowych oraz głównych na stacjach wyraża się równaniem

$$V_{zwr} = 0,5 \cdot V_p$$

to okaże się, że możliwości stosowania rozjazdów o promieniu toru zwrotnego 1200 m kończą się na prędkości $V_p = 200$ km/h. Wynika to z przekształcenia podstawowej zależności na przyspieszenie odśrodkowe

panujące w pojeździe poruszającym się po łuku poziomym bez przechyłki:

$$a = \frac{v^2}{R} \quad (1)$$

gdzie:

- a przyspieszenie odśrodkowe [m/s²],
- v prędkość pociągu [m/s],
- R promień łuku poziomego [m].

Po podstawieniu do wzoru (1) za v prędkości maksymalnej pociągów na torze zwrotnym V_{zwr} wyrażonej w [km/h], przyspieszenia dopuszczalnego a_{dop} (zgodnie z [9, 11] dla rozjazdów należy przyjmować $a_{dop} = 0,65$ m/s), promienia $R=1200$ m i przekształceniu wzoru ze względu na V_{zwr} otrzymujemy bowiem

$$V_{zwr} = 3,6 \cdot \sqrt{a_{dop} \cdot R} = 3,6 \cdot \sqrt{0,65 \cdot 1200} = 100,5 \approx 100 \text{ [km/h]} \quad (2)$$

Z tego względu, w przepisach [9] uwzględniających prędkości pociągów do 250 km/h, pojawiła się wzmianka o rozjeździe o parametrach 2500-1:26,5 umożliwiającym przejazd przez tor zwrotny z prędkością 130 km/h. Rozjazd ten nie spełnia jednak wymagań stawianych nowo budowanym liniom

dużych prędkości w sensie [4] (a właśnie taką ma być projektowana linia „Y”).

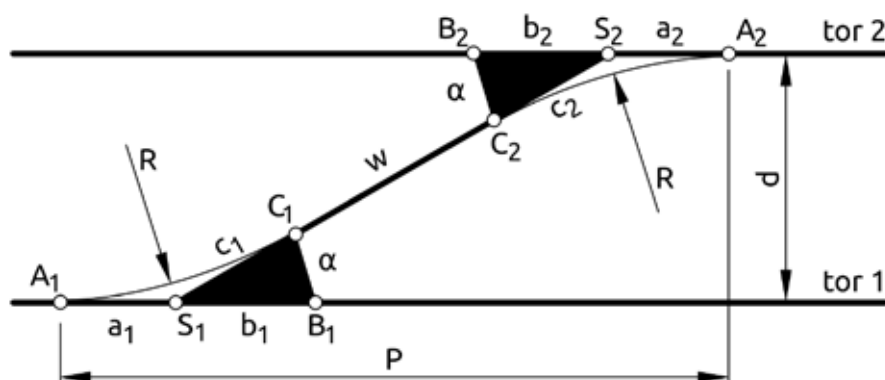
Prędkość przejazdu przez rozjazd ułożony w torach szlakowych lub torach głównych na stacjach jest ograniczona nie tylko ze względu na promień toru zwrotnego, ale i kształt całego połączenia lub rozgałęzienia torów. Takie ograniczenie powstaje już w jednym z najprostszyc układów — połączeniu dwóch torów równoległych rozjazdami o jednakowym skosie, występujących powszechnie w torach głównych w postaci tzw. przejść trapezowych (rys.1).

Przy znanych rodzajach rozjazdów oraz odległości między torami d , elementy takiego połączenia obliczamy ze wzorów:

$$w = \frac{d}{\sin \alpha} - c_1 - c_2 \quad (3)$$

$$P = \alpha_1 + \alpha_2 + \frac{d}{\sin \alpha} = \alpha_1 + \alpha_2 + d \cdot n \quad (4)$$

Przejazd z toru nr 1 na tor nr 2 oznacza pokonanie dwóch łuków odwrotnych o promieniu R każdy rozdzielonych krótką wstawką prostą o długości w . W takim przypadku należy — zgodnie z [2] — brać pod uwagę przyrost przyspieszenia niezrównoważonego, wyrażony zależnością



1. Połączenie dwóch torów równoległych rozjazdami o jednakowych skosach

$$\theta_{dop} = \frac{V^3}{3,6^3 \cdot R \cdot l_{wag}} \quad dla l_{wag} < w, \quad (5)$$

$$\frac{V^3}{3,6^3 \cdot (l_{wag} + w)} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_x} \right) \quad dla l_{wag} \geq w,$$

gdzie:

- V prędkość pociągu [km/h],
- ψ_{dop} przyrost przyspieszenia (na PKP $\psi_{dop} = 1,0 \text{ m/s}^2$),
- l_{wag} długość bazy sztywnej wagonu (wg UIC $l_{wag} = 20 \text{ m}$),
- w długość wstawki prostej między łukami [m],
- R promień toru zwrotnego rozjazdu [m],
- R_x promień łuku na przeciwległym końcu wstawki prostej [m] (w układzie z rys. 1 $R = R_x$).

Spełnienie warunku $\psi \leq \psi_{dop}$ wymaga odpowiedniej długości wstawki w , do czego niezbędne jest zastosowanie większego rozstawu torów (tab.1). Należy dodać, że podane w tabeli wartości zapewniają spełnienie wspomnianego warunku przy bazie sztywnej wagonu $l_{wag} = 17,2 \text{ m}$, obowiązującej wcześniej na PKP. Także inne kraje europejskie w analizie wartości kinematycznych występujących w torach zwrotnych rozjazdów stosują odmiennie długości w zakresie 17,00 – 19,00 m.

Czołowi światłowi producenci rozjazdów poszukują rozwiązania wymienionych problemów m. in. za pomocą rozjazdów zwyczajnych o odmiennym do powszechnie stosowanego układach geometrycznych. W rozjazdach tych w torze zwrotnym zamiast łuku o stałej krzywiznie (a więc i stałym promieniu) stosowane są odcinki torów o zmiennej krzywiznie, co zapewnia:

- łagodniejszy przejazd zarówno przez pojedynczy rozjazd, jak i przez połączenie torów równoległych;
- brak potrzeby zwiększenia rozstawu torów w celu wykonania połączenia torów równoległych rozjazdami o jednakowym skosie.

Wykorzystanie klotoidy w torze zwrotnym

Tory zwrotne rozjazdów to jedyne miejsce w torach szlakowych oraz głównych stacyjnych linii dużych prędkości, w których łuk kołowy bezpośrednio styka się z prostą. Zjawiska kinematyczne, jakie temu towarzyszą, przedstawiono na rys.2. Zwracając uwagę skokowe zmiany wartości szybkości przyrostu przyspieszenia na krańcach toru zwrotnego. Podobne własności mają wykresy przyspieszeń i szybkości jego zmian podczas przejazdu przez połączenie torów równoległych.

Standardowo między prostą a łukiem kołowym wykonywana jest krzywa przejściowa. Zachodzi pytanie — czy analogicznego rozwiązania nie da się zastosować w torach zwrotnych rozjazdów przeznaczonych dla dużych prędkości. Bezpośrednie przeniesienie takiego układu do rozjazdów nie jest możliwe z uwagi na wielkości przesunięć toru. Na przykład dla krzywej przejściowej w postaci paraboli trzeciego stopnia o długości $L=19 \text{ m}$ łączącej prostą z łukiem o promieniu $R=2500 \text{ m}$ rzędne przekroczą wartość $0,001 \text{ m}$ w odległości 7 m od początku krzywej przejściowej, a rzędna końcowa wyniesie niespełna $0,025 \text{ m}$. Dlatego projektanci rozjazdów zrezygnowali ze stosowania układów zapewniających ciągły i monotoniczny przyrost krzywizny między prostą a torem zwrotnym rozjazdu w przedziale $(0; 1/R)$. Uznali, że istotniejsza od płynności przejazdu przez początek rozjazdu jest płynność pokonania środkowej części połączenia torów równoległych. Postanowili przy tym wykorzystać w nowo projektowanych układach geometrycznych klotoidę, która jako jedyna z krzywych proponowanych na krzywe przejściowe na całej swojej długości spełnia warunek proporcjonalności krzywizny do długości łuku.

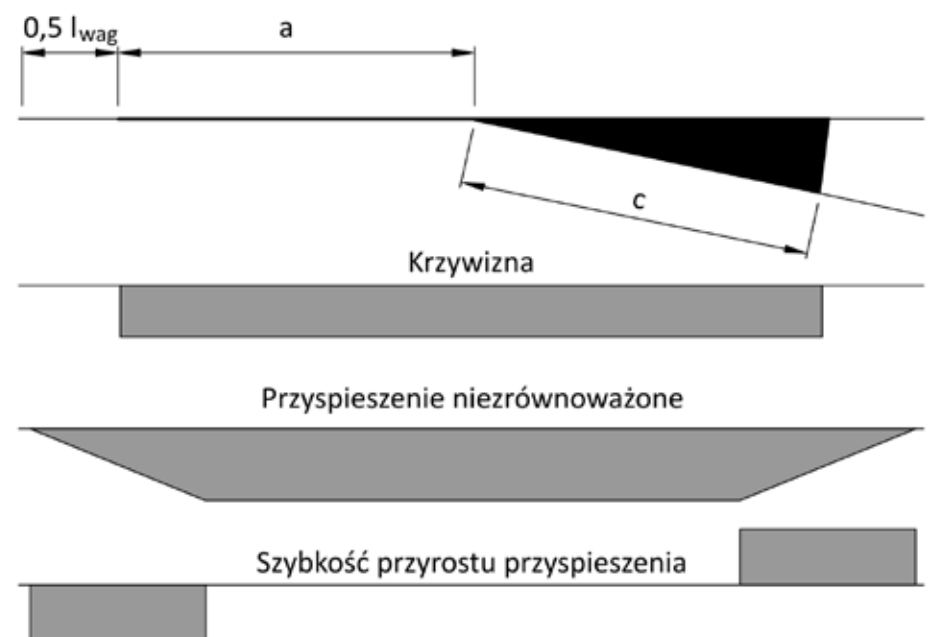
Możliwości wykorzystania klotoidy w kształtowaniu krzywych przejściowych opisano szczegółowo w wielu pracach, np. w [1, 5, 6]. Dla projektantów rozjazdów najważniejsze okazały się możliwości wykorzystania tej krzywej w następujących układach geometrycznych:

- biklotoidach symetrycznych i niesymetrycznych;
- krzywych owalnych (połączeniach za pomocą klotoidy dwóch lub więcej skierowanych w tę samą stronę łuków o różnych promieniach);
- krzywych esowych (połączeniach za pomocą klotoid łuków odwrotnych).

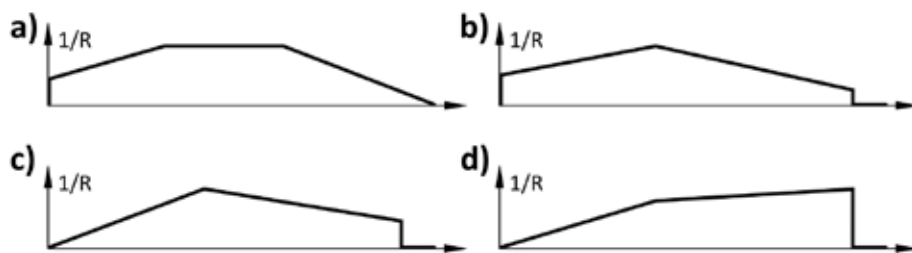
Możliwe przebiegi krzywizny toru zwrotnego przedstawiono na rys.3. Szczegóły rozwiązania zależą od przeznaczenia rozjazdu. Inne warunki powinien spełniać rozjazd prowadzący np. na łącznicę. W takim wypadku najkorzystniejszy jest układ geometryczny przedstawiony na 3d, który umożliwi płynny przejazd z dużą prędkością przez początek rozjazdu i wyjazd z toru zwrotnego po łuku o dużym promieniu, będącym najlepiej przedłużeniem toru zwrotnego rozjazdu. W takim wypadku tor zwrotny rozjazdu pełni rolę krzywej przejściowej między prostą a

Tab.1. Przyjmowane na PKP rozstawy torów w połączeniach torów równoległych rozjazdami o jednokowych skosach [9]

Typ rozjazdu	Rozstaw torów [m]	Prędkość w torze zwrotnym [km/h]
500-1:12	4,00	65
760-1:14	4,75	80
1200-1:18,5	4,50	100
2500-1:26,5	4,30	130



2. Obraz przykładowej prostej po transformacji układu współrzędnych (w skali skażonej) [3]



3. Wykresy stosowanych krzywizn w torach zwrotnych rozjazdów klotoidalnych [8, 10]

łukiem kołowym. Natomiast inne wymagania są stawiane układom rozjazdów stosowanych w połączeniach torów równoległych. Tam bardziej zależy na tym, żeby w końcu rozjazdu promień toru zwrotnego $R \rightarrow \infty$, oraz na zachowaniu rozstawu torów o wartości $d = 4,00$ m (np. rys.3a).

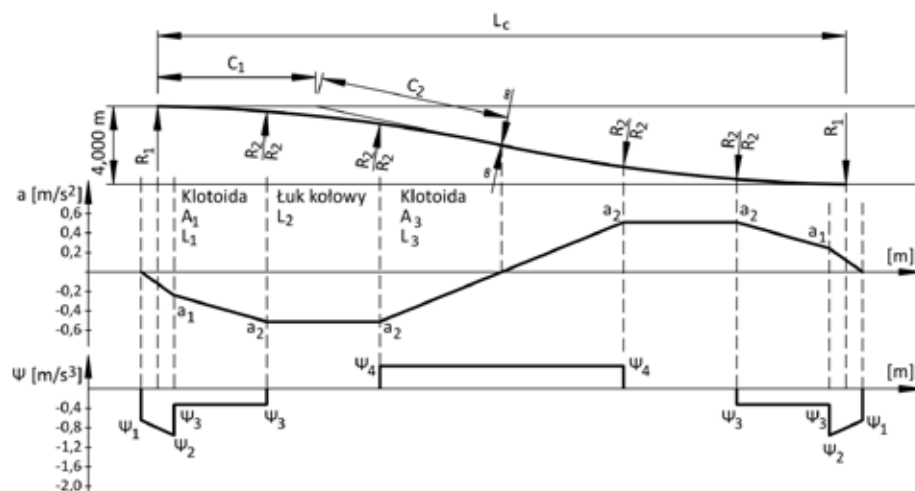
Przykładowe rozwiązania dostosowane do układania w przejściach trapezowych na liniach dużych prędkości przedstawiono na rys.4. Są to rozjazdy klotoidalne produkcji VAE, których układ można symbolicznie opisać jako „R1/R2/R3 1:n”.

W przedstawionych rozjazdach tor zwrotny zaczyna się klotoidą o długości L_1 , promieniu

początkowym R_1 i promieniu końcowym R_2 . W środkowej części rozjazdu tor zwrotny stanowi łuk o promieniu R_2 i długości L_2 . Ostatni fragment toru zwrotnego to klotoida o długości łącząca promień R_2 z prostą ($R_3 = \infty$).

W przedstawionych konstrukcjach należy zwrócić uwagę na kilka istotnych cech:

- długości poszczególnych odcinków krzywych tworzących tor zwrotny dobrane są w taki sposób, aby czas przejazdu przez nie wynosił ok. 1 sek;
- za pomocą tych rozjazdów możliwe jest wykonanie połączenia dwóch torów równoległych oddalonych od siebie o $d = 4,00$ m;
- przejazd przez tak wykonane układy geo-



Parametr	Jednostka	Rozjazd 16000/ 6100/ ∞	Rozjazd 10000/4000/ ∞
Skos		1:47,833	1:32,05
V_{zwr}	[km/h]	200	160
R_1	[m]	16000	10000
R_2	[m]	6100	4000
A_1	[m]	743,021	500,000
L_1	[m]	56,0000	37,5000
L_2	[m]	58,0624	48,3030
A_3	[m]	617,454	470,000
L_3	[m]	62,5000	55,2250
a_1	[m/s ²]	0,24	0,26
a_2	[m/s ²]	0,51	0,49
ψ_1	[m/s ³]	0,63	0,52
ψ_2	[m/s ³]	0,94	0,87
ψ_3	[m/s ³]	0,31	0,35
ψ_4	[m/s ³]	0,45	0,40
C_1	[m]	81,239	62,862
C_2	[m]	95,329	78,252
L_c	[m]	353,093	282,177

4. Parametry geometryczne i wartości kinematyczne połączeń torów równoległych wykonanych za pomocą rozjazdów klotoidalnych $R_1/R_2/\infty$ 1:n [7]

metryczne bardzo przypomina przejazd przez poszerzenie międzytorza wykonane za pomocą dwóch łuków odwrrotnych z czterema krzywymi przejściowymi, bez wstawki prostej i bez przechyłki.

Wszystko to powoduje, że zwiększa się komfort jazdy przez takie układy, zmniejsza się zużycie elementów rozjazdów oraz wymagane jest mniej terenu na równie stacyjne.

Odmienne układy ma rozjazd biklotoidalny 7500/3500/15000 1:38,46 (rys.5). W środkowej części toru zwrotnego nie ma on odcinka o stałym promieniu, a ponadto koniec toru zwrotnego stanowi odcinek prosty. Umożliwia on jazdę po torze zwrotnym z prędkością 160 km/h i może być wykorzystywany przy wykonywaniu przejść trapezowych między torami odległymi o 4,00 m.

Inne wymagania stawiane są rozjazdom, które mają być wykorzystane przy budowie łącznic odchodzących od linii dużych prędkości. W takiej sytuacji najkorzystniejsze są układy, które pozwalają na przedłużenie łuku toru zwrotnego poza rozjazd. Wówczas przejazd przez odgałęzienie i łącznicę może się odbywać ze stałą prędkością, a przeciwniegi koniec łuku można połączyć z położoną za nim prostą za pomocą normalnej krzywej przejściowej. Ponieważ rozjazd prowadzący na łącznicę jest układany bez przechyłki, sam łuk kołowy będący jego przedłużeniem musi mieć odpowiednio duży promień.

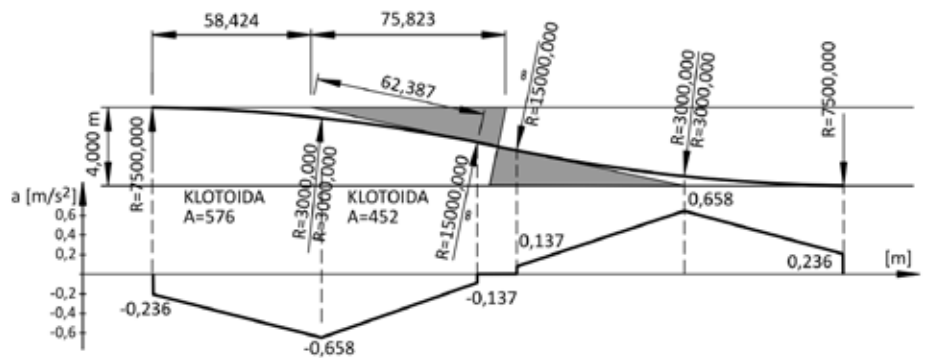
Przykład takiego zastosowania rozjazdu o zmiennej krzywiznie toru zwrotnego przedstawiono na rys. 6. Rozjazd o promieniu 4800/2450 m i skosie 1:24,26 umożliwi jazdę po torze zwrotnym i łuku łącznicy z prędkością 130 km/h.

Podsumowanie

Podczas planowania budowy kolei dużych prędkości należy brać pod uwagę specyficzne wymagania stawiane rozjazdom kolejowym. W Polsce nie zostało to uwzględnione nawet w najnowszych przepisach [9]. Nie można bowiem przyjąć, że rozjazd 2500 1:26,5 spełnia wymagania linii przeznaczonych dla prędkości 300 km/h i większych. Prowadzone szczegółowe badania dotyczyły jedynie rozjazdów o stałej krzywiznie toru zwrotnego, wyposażonych w nowoczesne krzyżownice z ruchomymi dziobami, umożliwiającymi jazdę po torze zasadniczym z prędkością $V = 200$ km/h. Dlatego z tym większą uwagą należy śledzić poczynania wiodących producentów rozjazdów oraz doświadczenia zarządów kolejowych, na których duże prędkości się od lat powszechnie stosowane. Różnorodność stosowanych konstrukcji i układów geometrycznych rozjazdów jest bardzo duża, o czym świadczy przedstawiony w tab. 2 fragment listy referencyjnej tylko jednego producenta. ◀

Materiały źródłowe:

- [1] Bałuch H.: Optymalizacja układów geometrycznych toru. WKŁ, Warszawa, 1983.
- [2] Bałuch H.: Układy geometryczne połączeń torów. WKŁ, Warszawa, 1989.
- [3] Cejmer J.: Badania oddziaływań dynamicznych w rozjazdach przeznaczonych do dużych prędkości pociągów. Problemy Kolejnictwa, z. 140, 2005.
- [4] Decyzja Komisji Europejskiej 2002/732/EC, 30.05.2002.
- [5] Grodzicki S.: Geometria tras — algorytmy obliczeń, komputerowo wspomaganie projektowanie. WKŁ, Warszawa, 1987.
- [6] Lipiński M.: Tablice do tyczenia krzywych. Cz. II. Klotoida. PPWK, Warszawa, wyd. 7, 1978.
- [7] Materiały uzyskane przez autora od VAE Brasil. São Paulo, 2010.
- [8] Oswald J. R.: Turnout Geometry Optimization with Dynamic Simulation of Track and Vehicle. 2000 AREMA Annual Conference Proceedings, Dostępny w formie elektronicznej na stronie internetowej <http://www.arena.org>.
- [9] Standardy techniczne. Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości km/h (dla taboru konwencjonalnego) / 250 km/h (dla taboru z wychylnym pudłem). PKP PLK S.A., Warszawa, 2009.
- [10] Strona internetowa <http://www.vostalpine.com/vae/en.html>, dostęp 2011-02-12.
- [11] Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1 (D-1). PKP PLK S.A., Warszawa, 2005.



5. Parametry połączenia torów równoległych wykonanych za pomocą rozjazdów biklotoidalnych 7500/3500/15000 1:38,46 [10]



6. Odgałęzienie toru na linii wielkiej prędkości wykonane za pomocą rozjazdu 4800/2450 1:24,26 [10]

Tab.2. Rozjazdy stosowane na niektórych liniach wielkich prędkości w Europie [10]

Kraj	Linia	Vp/Vzwr [km/h]	Typ rozjazdu
Hiszpania	Madryt – Sewilla	300/160	60E1-10000/4000 1:31,05
	Madryt – Barcelona	350/100	60E1-3000/1500 1:18,5
		350/160	60E1-10000/4000 1:39
Niemcy	Hannover – Würzburg	350/220	60E1-17000/7300 1:50
		280/100	60E1-1200 1:18,5
		280/130	60E1-2500 1:26,5
	Karlsruhe – Stuttgart	280/200	60E1-7000/6000 1:42
		280/100	60E1-1200 1:18,5
		280/130	60E1-2500 1:26,5
Włochy	Rzym – Florencja	280/100	60E1-3000/1500 1:18,5
		280/130	60E1-4800/2450 1:24,26
		250/160	60E1-6000/3700 1:32,5
		280/160	60E1-6000/3700 1:45,455
		280/160	60E1-7500/3000/15000 1:38,462