

# Spolehlivost přestupů

Vladislav Martínek<sup>1</sup> a Michal Žemlička<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dept. of Software Engineering  
Charles University in Prague  
Prague, Czech Republic  
martinek@ksi.mff.cuni.cz

<sup>2</sup> Network and Labs Management Center  
Charles University in Prague  
Prague, Czech Republic  
zemlicka@sisal.mff.cuni.cz

*Abstrakt:* Klasické algoritmy používané pro vyhledávání cest v sítích hromadné dopravy typicky očekávají, že poměrně přesně známe délku cesty mezi jednotlivými uzly, i že víme, kdy přesně daný spoj odjede a přijede. Mnoho lidí z vlastní zkušenosti ví, že tyto výchozí údaje pro vyhledávání spojení mohou být ovlivněny celou řadou faktorů. Dopad vnějších vlivů lze za určitých podmínek odhadnout z dostupných historických dat.

V tomto příspěvku nahlédneme na plánování cest v hromadné dopravě z pravděpodobnostního hlediska. Ukážeme, jak určit spolehlivost přestupů a předneseme vybraná praktická využití.

## 1 Úvod

V prostředí velkých měst mají lidé často na výběr vedle individuálních způsobů přepravy také rozsáhlou síť hromadné přepravy. Ve druhém případě může být spojení plánováno na základě jízdních řádů vydaných dopravcem. Při cestování se většinou snažíme nalézt nejkratší nebo jinak výhodnou cestu. To nám ulehčují různé plánovače spojení, které na základě jízdních řádů hledají nejkratší cesty většinou s malým počtem přestupů.

Spolehlivost naplánovaných tras závisí na dodržování času daných jízdním řádem. Chování reálných dopravních sítí však obsahuje prvek náhodnosti. Co když se spoj, kterým jedeme, zdrží v husté dopravě, stihneme pak přestup na další spoj, jak bylo v plánu? Počítal plánovač se zdržením, protože touto denní dobou mají určité spoje v určitém úseku často zpoždění? Nebo stihneme přestoupit jen proto, že interval navazujícího spoje vyšel dostatečně daleko od našeho plánovaného času příchodu na zastávku?

V úvodní části článku je popsána problematika, kterou se budeme zabývat. Dále je rozebrán mechanismus přestupů. Následuje sekce věnující se zpoždění a metodami, které se snaží tento negativní jev ošetřit. Článek předkládá metody jak využít historických provozních dat ke zvýšení spolehlivosti plánování cest. V závěru shrnujeme prezentované poznatky a formulujeme cíle pro budoucí práci.

## 2 Přestupy

Základním úkolem plánovače spojení v městské hromadné dopravě je nalezení nejvhodnější cesty v komplexní dopravní síti. Podoba výsledného spojení je dána volbou přepravních prostředků v nástupních a přestupních bodech. Často to, jak na sebe jednotlivé spoje navazují, ovlivní výběr cesty. Čím více informací budeme mít o návaznosti jednotlivých spojů, tím kvalifikovanější rozhodnutí může učinit plánovač při výběru spojení.

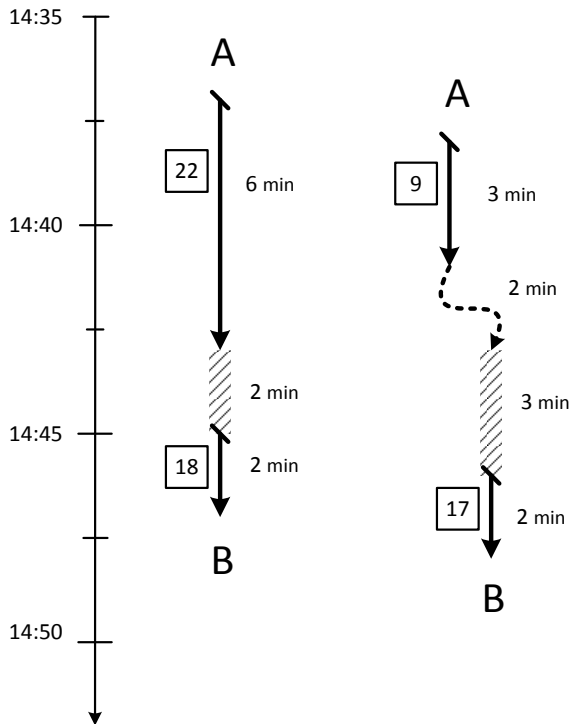
**Praktický příklad, část 1:** Jan má pracovní schůzku, na kterou by neměl přijít pozdě. Schůzka začíná v 15:00. Jan chce mít jistotu, že dorazí včas, tak si nechá 10 minut rezervu. Plánovač nabídne dvě cesty. První spojení je tvořeno linkou 22 a 18, cesta začíná v 14:37 a v cíli by měl Jan být v 14:47. Druhé spojení začíná v 14:38 a v cíli je v 14:48, používá linky 9 a 17. Jan vybere první spojení, protože je v cíli dříve a také neobsahuje pěší přechod mezi zastávkami. Učinil správné rozhodnutí? Bude Janovi skutečně stačit relativně velká 10 minutová rezerva pokud nějaká část plánu cesty nevyjde?

### 2.1 Přestup podle jízdního řádu

Netriviální dopravní spojení je realizováno alespoň dvěma různými prostředky. Přestup mezi dvěma linkami je plánován na základě času příjezdu prvního spoje, doby potřebné pro přesun cestujícího mezi zastávkami a času příjezdu cílového spoje. Jízdní řády dávají cestujícímu stabilní informaci o době, kterou stráví čekáním na zastávce.

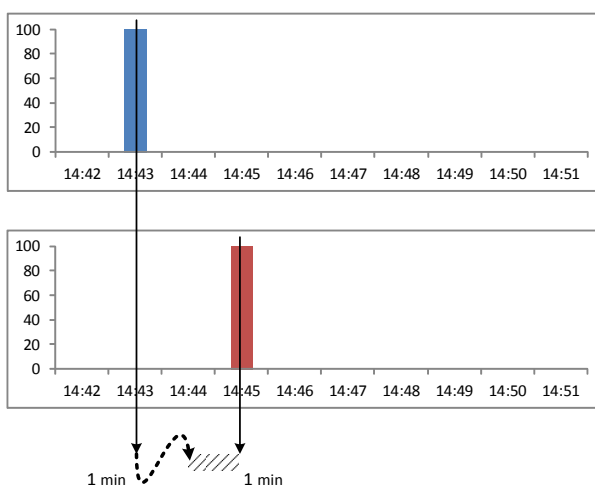
Pokud se řídíme striktně jízdním řádem, spoléháme na to, že každý spoj dané linky je na zastávce vždy v předepsaný okamžik. Počítáme s tím, že 100% spojů je přistaveno k zastávkovému ostrůvku v čas určený jízdním řádem. Při výpočtu doby pro přestup nepočítáme s tím, že by se nějaké procento spojů opozdilo. Situaci ukazuje obrázek 2.

Pokud dochází k přestupu v rámci jednoho ostrůvku, pak je čas potřebný pro výstup z prvního spoje a čas potřebný pro nástup do dalšího spoje brán jako minimální čas pro přestup. Pokud bychom uvažovali přestup mezi spoji,



Obrázek 1: Janův plán cesty. (na svislé ose je čas)

kteří přijedou ve stejný okamžik, nebylo by možné zaručit pořadí příjezdu spojů na zastávku ani bezpečný přestup mezi nimi. Uvažujme 1 minutu jako minimální čas potřebný pro přestup. Celková doba mezi příjezdem tramvaje č.22 a odjezdem tramvaje č.18 jsou 2 minuty. Cestující tedy čeká 1 minutu na příjezd tramvaje č.18.



Obrázek 2: Přestup mezi linkami 22 a 18 podle jízdního řádu. (na svislé ose je zpoždění ve vteřinách, na vodorovné ose je čas)

## 2.2 Rezerva při přestupu

Doba vyhrazená na změnu spoje je tvořena dobou nutnou pro výstup cestujícího z výchozího spoje a přesun mezi zastávkami (tato doba je nutná a nelze ji zkrátit) a dobou strávenou čekáním na příjezd cílového spoje.

Ve skutečnosti, se často stává, že se spoj zpozdí a v tom případě se posouvá časový interval vyhrazený pro přestup mezi spoji. S dobou pro přesun cestujícího mezi zastávkami se hýbat nedá, ale vzniklé zpoždění spoje lze kompenzovat dobou pro čekání na příjezd cílového spoje. Navíc pokud i cílový spoj má zpoždění, vzniká tak další rezerva. Doba, která měla být podle plánu cestujícím přečkována na příjezd cílového spoje, může být ve skutečnosti spotřebována jako přirozená rezerva pro případné zpoždění výchozího spoje.

## 2.3 Selhání přestupu

Pokud je odchylka od jízdních řádů příliš velká nebo pokud spoje navazují příliš těsně, může dojít k tomu, že cestující navazující spoj nestihne a přestup se neuskuteční podle plánu. V takovém případě je cestující nucen změnit zbývající část plánu. To typicky vede k nedodržení požadovaného času příjezdu, což může být pro cestujícího značně nepříjemné.

## 2.4 Spolehlivost přestupu

Spolehlivost přestupu lze nahlížet jako poměr nedodržených naplánovaných přestupů vůči všem naplánovaným přestupům. Zvýšením spolehlivosti přestupů bychom zvýšili celkovou spolehlivost plánování, zvláště u plánů cest, které sestávají z více různých úseků. Hlavní příčinou selhání přestupů bývají odchylky od plánovaného provozu.

## 3 Zpoždění

Existuje několik způsobů jak se vyrovnat s nepravidelností provozu hromadné dopravy při plánování spojení. Jeden z jednoduchých přístupů je jet o jeden spoj dříve. Tento přístup je časově neefektivní zvláště v případě, kdy spoje mají dlouhý interval.

Přidávat rezervu navíc ke každému přestupu je nevýhodné. Plánovač by pak uživateli předkládal spojení časově náročnější, než je ve skutečnosti potřeba. Prodlužovala by se tak paušálně doba čekání a tím i celková délka cesty, což je nežádoucí. Je proto potřeba nalézt určitý postup pro vyhodnocení případů, kdy se rezerva vyplatí a jak velká má být.

Pokud máme informaci o možném zpoždění na dané lince, můžeme tomu přizpůsobit plán cesty. Můžeme díky těmto znalostem zvolit jinou linku, což může vést k naplánování zcela odlišné trasy.

### 3.1 Nepravidelnost provozu

Plánování spojení je typicky vázáno na jízdní řády dané dopravcem. Nepravidelnosti v jízdních řádech jsou dobře známým jevem, objevují se napříč různými úrovněmi přepravní sítě hromadné dopravy osob, jak ukazuje [1]. Na zpoždění vznikající v dopravní síti může být nahlíženo různě. Existuje celá řada statistických ohodnocení. Yetiskul a Senbil [2] se zabývají distribucí dojezdových časů během dne s ohledem na geografické oblasti města Ankara. Olson a Haugland [3] rozdělují zpoždění na hlavní a vedlejší. Primární jsou způsobena přímým vlivem dopravních prostředků, zatímco ta sekundární jsou zavlečena ze spojů, na které se čeká.

### 3.2 Plánování spojení s pomocí AVL dat

Řada dopravců monitoruje pohyb svých přepravních prostředků pomocí systémů automatického sledování vozidel - Automated Vehicle Location (AVL). Pokud systém AVL pracuje v reálném čase, pak je možné tyto informace využít k aktualizaci plánu spojení. Takto získaná aktuální provozní data lze využít k predikci odchylek od jízdních řádů v krátkodobém výhledu. Příkladem aplikace tohoto přístupu je [4, 5].

Nevýhodou tohoto přístupu je, že zpoždění spoje je možné predikovat až od okamžiku, kdy zpoždění nastalo v dřívější části trasy spoje. To znamená, že plán je nutné měnit v okamžiku, kdy je již částečně realizován. To s sebou nese výrazná omezení.

Na základě statistického zpracování historie provozních dat je však možné do jisté míry předvídat chování spojů, co se týká zpoždění [6]. Máme tak možnost počítat s pravděpodobnými odchylkami už ve fázi prvotního plánování. Cestující tak dostane do ruky plán spojení, který ho předem informuje o rezervách, které byly přidány kvůli pravděpodobnému zpoždění spoje. Zajímavý přístup jak realizovat predikci zpoždění pomocí neuronové sítě byl testován Mazloumi et al. [7]. Na základě predikce je pak možné počítat s pravděpodobnou hodnotou zpoždění a sestavit podle toho požadované spojení.

### 3.3 Průměrné zpoždění v Praze

V současné době máme k dispozici provozní data tramvajové dopravy v Praze z roku 2008. Data byla získána z AVL systému „DORIS“. Provozní data jsou porovnávána s plánovanými jízdními řády tak, aby bylo možné určit odchylky. Každý záznam je datován, lze tedy zpětně rekonstruovat skutečný průběh jízdy každého spoje, který vyjel na trasu. Data zkoumáme již delší dobu. Při rozboru jsme pozorovali výrazné periodicity v odchylkách jednotlivých spojů vázané na denní dobu, zejména v pracovní dny.

Jeden z možných přístupů jak dosáhnout efektivního využití rezervního času je počítat s pravděpodobným zpožděním v případech, kdy si to situace vyžaduje. Jeden z případů, kdy dochází k častému selhání přestupu je, když

zdrojový spoj jezdí se zpožděním a cílový spoj jezdí pravidelně včas. Předpokládáme, že ve stejnou denní dobu bude zpoždění spojů blízké průměru z minulého období. Pokud predikci zpoždění spojů založenou na provozních datech z minulého období plošně aplikujeme na jízdní řády v následujícím období, můžeme tak vylepšit výchozí data pro určování přestupů. Tím se zvýší spolehlivost v daném případě na 80% až 90%. Konkrétní hodnoty ukazuje tabulka 1.

Spolehlivost přestupů podle jízdních řádů:	tram. linky	
	20-18	12-9
dopravce	86,91%	72,27%
predikovaných po dnech	89,33%	80,63%
predikovaných po hodinách	89,38%	87,59%

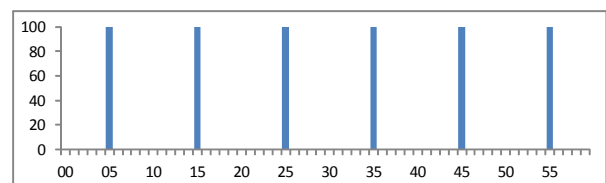
Tabulka 1: Spolehlivost predikce pro přestupy mezi linkami 20-18 a 12-9

## 4 Pravděpodobnostní mapy

Z předchozího je vidět, že i jednoduchá predikce založená na průměrném zpoždění přináší na dané dopravní síti výsledky. Nicméně pro přesnější vyhodnocování spolehlivosti přestupů bychom potřebovali jemnější metodu. Především potřebujeme odhadnout, zda je doba, kterou plánovač přiřadil přestupu, dostatečná a přestup neselže.

### 4.1 Plánovaný výskyt spoje

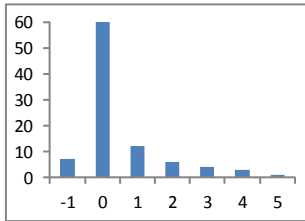
Jízdní řády říkají, kdy by se daný spoj měl vyskytovat na zastávce, rozlišují pouze dva stavy: spoj je na zastávce a spoj není na zastávce. Pokud zaznamenáme předpokládaný výskyt spoje na dané zastávce v daný časový úsek, získáme graf 3.



Obrázek 3: Četnost výskytu spojů linky 18 podle jízdního řádu. (na svislé ose je četnost, na vodorovné ose je čas v minutách)

### 4.2 Četnost zpoždění

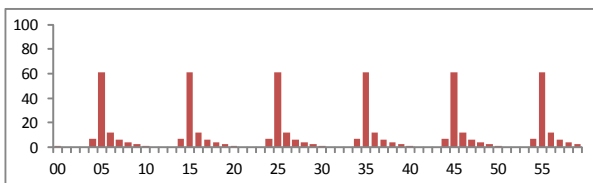
Na základě historických provozních dat jsme pro každou linku schopni říct, kolikrát za určité období přijela na danou zastávku včas, kolikrát se zpozdila o minutu, dvě, apod. nebo kolikrát přijela o minutu dříve. Když tato data vyneseme na časovou osu, získáme graf četností zpoždění.



Obrázek 4: Rozdělení zpoždění spojů linky 18. (na svislé ose je četnost, na vodoroné ose je zpoždění ve vteřinách)

Graf na obrázku 4 ukazuje v kolika případech a o kolik se v minulosti opozdil daný spoj na dané zastávce.

Na základě dřívějších zkušeností víme, že konkrétní spoje se zpožďují pravidelně zejména s vazbou na denní dobu. Dále také víme, že na základě historických provozních dat, lze vytvořit použitelnou predikci zpoždění. Pokud tedy budeme předpokládat, že četnost zpoždění bude stejná jako v minulosti, pak lze výskyty v grafu 4 lze použít jako predikci chování spojů dané linky. Předpokládejme, že o stejnou dobu se zpozdí stejné procento spojů. V tom případě výskyty spojů nebudou odpovídat jízdnímu řádu, ale upravené pravděpodobnostní mapě 5. Takto odhadnuté chování spojů dané linky by mělo lépe odpovídat realitě.



Obrázek 5: Četnost výskytu spojů linky 18 odhadnutá podle rozdělení zpoždění. (na svislé ose je četnost, na vodoroné ose je čas v minutách)

### 4.3 Informovaný přestup

V případě spojů, u kterých pravidelně dochází k odchylkám od jízdního řádu, může být výhodné odhadovat zpoždění například pomocí historických provozních dat. Pokud použijeme dřívější výskyty zpoždění k vytvoření pravděpodobnostní mapy, můžeme tak získat relevantní představu o chování spoje v kontextu dané zastávky. V tomto případě se nelze spolehnout na výskyt spoje na zastávce v jeden okamžik. Je potřeba spočítat pravděpodobnost kombinací výskytů relevantních spojů, které jsou od sebe na časové ose vzdálené alespoň minimální dobu potřebnou pro přestup.

Za předpokladu, že dané linky tramvajů jsou na sobě nezávislé, lze pravděpodobnost úspěšného přestupu odhadnout jako:

$$\sum_{t_1} \left( p_1(t_1) * \sum_{(t_1+t_m) \leq t_2} (p_2(t_2)) \right),$$

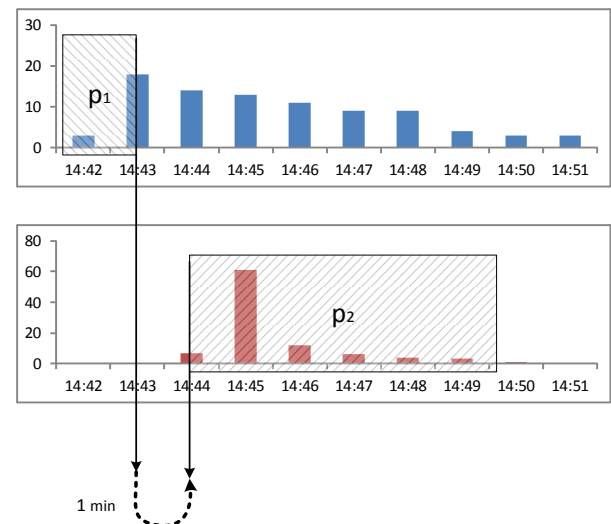
kde:

$t_1, t_2$  je čas,

$t_m$  je minimální doba pro přestup,

$p_1(t), p_2(t)$  je pravděpodobnost příjezdu spoje 1,2 v čase  $t$ .

Vezmeme stejný přestup jako v předchozím případě, přestup mezi linkami 22 a 18 na zastávce „Malostranská“. Minimální doba potřebná pro přestup v rámci jednoho zastávkového ostrůvku zůstává - 1 minuta. Obrázek 6 ukazuje pravděpodobnostní mapy obou spojů. Doba přestupu nelze určit jednoznačně jako v předchozím případě.



Obrázek 6: Informovaný přestup mezi linkami 22 a 18. (na svislé ose je četnost, na vodoroné ose je čas)

Pokud tramvaj č.22 přijede před 14:44 včetně, je zde vysoká pravděpodobnost, že cestující stihne přestoupit na linku 18. Většina výskytů linky 18 je až od 14:45, což je v souladu s jízdním řádem. Pokud však tramvaj č.22 přijede o 2 a více minut později, než by měla podle jízdního řádu, tj. 14:45 a později, je pravděpodobnost stihnutí přestupu jen 26%. Přitom podle četnosti tato možnost představuje 52% všech relevantních příjezdů tramvaje č.22 v danou dobu.

### 4.4 Aplikace

Ukazuje se, že jednou z cest ke zvýšení spolehlivosti plánování spojení, je odhadovat pravděpodobný průběh přestupu. Pokud budeme schopni odhadnout úspěšnost každé relevantní varianty přestupu, pak bude možné preferovat při plánování spojení ty přestupy, které mají vyšší naději na úspěch. To však vyžaduje vícekritériální algoritmus pro

výběr spojení. Výsledkem by mohl být návrh několika různých spojení, která jsou časově málo náročná a přitom mají dostatečně velkou naději na úspěch. Koncová volba spojení by mohla být přenechána uživateli.

## 5 Závěr

Plánování spojení v městské hromadné dopravě v sobě skrývá víc než jen úlohu nalézt nejkratší cestu k cíli. Městská dopravní síť je úzce svázána s dalšími aspekty moderního života. Je potřeba vidět vyhledávání cest v stále komplexnějším měřítku. Dalo by se říci, že pokud dopravní síť dosáhne určitého stupně složitosti, chová se v určitém smyslu charakteristicky. Za tohoto předpokladu lze její chování studovat a získané poznatky úspěšně využít pro predikci tohoto chování.

Pomocí popsané metody informovaných přestupů, jsme schopni odhadnout, které přestupy by zařazením do plánu cesty mohli způsobit jeho potenciální selhání. Můžeme zvolit míru pravděpodobnosti, která bude určovat, který přestup je pro nás ještě spolehlivý. Jízdní řády jsou stále výchozím bodem. Už jen pouhá informace o potenciálním riziku selhání může být pro cestující užitečná.

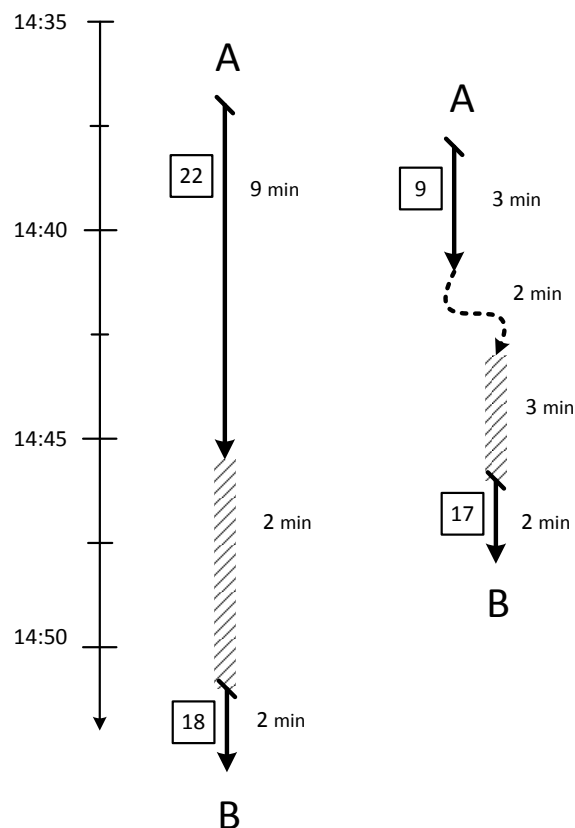
**Praktický příklad, část 2:** Janovi záleželo na včasném příjezdu na pracovní schůzku, proto volil rychlejší cestu a dokonce si dal velkou časovou rezervu. Problém je, že použitá linka 22 má v daném úseku často zpoždění, s čímž standartní plánovač nepočítá. Konkrétně je pravděpodobnost uskutečnění přestupu mezi linkou 22 a 18 v dané časy odhadnuta na necelých 38%. Situace je podrobně rozebrána na obrázku 6 a důsledkem je pozměněný itinerář 7 Janovy cesty. Dojde tak s velmi pravděpodobně k nestihnutí přestupu a Jan bude nucen čekat na další tramvaj linky 18. To ho zdrží natolik, že do cíle dorazí v 15:07, což je hluboko za jeho prvotním očekáváním. Pokud by Jan získal třeba jen nápořevdu, která trasa je spolehlivější, mohl stihnout svou schůzku.

Pokud metodu informovaných přestupů použijeme k ořezávání nespolehlivých přestupů přímo v uzlech při vyhledávání spojení, můžeme tak výrazně zvýšit spolehlivost plánovače. Výhodou oproti jiným metodám na zajištění spolehlivosti je, že vznikají časové rezervy jen tam, kde je nejvíce pravděpodobné, že budou spotřebovány.

Navíc uvedené postupy lze dobře uplatnit i na straně poskytovatele přepravních služeb. Lze například detekovat problematická místa, kde často dochází k selhání plánovaného přestupu a kde cestující zbytečně tráví čas čekáním na další spoj. V případě okrajových linek lze také detekovat místa, kde například při selhání některého přetupu zůstanou cestující izolováni bez navazující dopravy.

### 5.1 Plány do budoucna

Naším cílem do budoucna je začlenit uvedenou metodiku do vyhledávače spojení tak, aby byl schopen nalézt spo-



Obrázek 7: Skutečný průběh Janova plánu.

lehlivé a přitom časově efektivní spojení. Předložené metody mohou být použity pro multikriteriální vyhledávání k určení paramtru spolehlivosti. Při sestavování pravděpodobnostních map jsou použity četnosti. Jednou z výhod je, že lze snadno přidávat nově získaná data.

## Poděkování

Tento článek byl vytvořen za podpory projektu číslo 157710 Grantové agentury univerzity Karlovy a za podpory grantu SVV-2013-267312.

## Reference

- [1] P. Rietveld, F. Bruinsma, and D. van Vuuren, "Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 35, no. 6, pp. 539 – 559, 2001.
- [2] E. Yetiskul and M. Senbil, "Public bus transit travel-time variability in Ankara (Turkey)," *Transport Policy*, vol. 23, pp. 50–59, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X12000789>
- [3] N. O. Olsson and H. Haugland, "Influencing factors on train punctuality—results from some norwegian studies," *Transport Policy*, vol. 11, pp. 387–397, 2004.

- [4] D. N. Tien, T. MacDonald, and Z. Xu, “TDplanner: Public transport planning system with real-time route updates based on service delays and location tracking,” in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2011.
- [5] A. Karbassi and M. Barth, “Vehicle route prediction and time of arrival estimation techniques for improved transportation system management,” in *IEEE IV2003: Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*. IEEE Intelligent Transportation Syst, 2003, pp. 511–516, 4th Intelligent Vehicles Symposium, Columbus, OH, Jun 09-11, 2003.
- [6] M. Hickman, “Robust passenger itinerary planning using transit AVL data,” in *Intelligent Transportation Systems, 2002. Proceedings. The IEEE 5th International Conference on*, 2002, pp. 840–845.
- [7] E. Mazloumi, G. Currie, and G. Rose, “Using traffic flow data to predict bus travel time variability through an enhanced artificial neural network.” [Online]. Available: <http://intranet.imet.gr/Portals/0/UsefulDocuments/documents/03377.pdf>