



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Ladislav Roll

Vliv změny časové polohy vlaku na řízení provozu

Diplomová práce

**2019**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K617** ..... Ústav logistiky a managementu dopravy

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Ladislav Roll**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – LA – Logistika a řízení dopravních procesů**

Název tématu (česky): **Vliv změny časové polohy vlaku na řízení provozu**

Název tématu (anglicky): Influence of Change of Train Time Position on Operation Control

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Výběr úzkého hrdla v síti a výlukové situace
- Formulace metodiky pro analýzu provozních dat
- Analýza plnění grafikonu ze získaných dat
- Diskuze dispozičních opatření
- Vlastní návrh úprav dispozičních opatření
- Zhodnocení návrhu



- Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Hansen, Pachel (eds.): Railway Timetabling and Operation. 2nd edition. Eurailpress 2014.  
Vyhláška MD 173/1995 Sb., kterou se vydává dopravní řád drah. Aktuální znění.  
SŽDC D7. Předpis pro operativní řízení provozu. Praha, 2016.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Michl**  
**Ing. Michal Drábek, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2018**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **2. prosince 2019**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Tomáš Horák, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu logistiky a managementu dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Ladislav Roll  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 6. června 2019

### **Poděkování**

Rád bych poděkoval všem, kteří mi poskytli data, dobré rady a svůj čas pro vypracování této diplomové práce, především Ing. Zdeňku Michlovi a Ing. Michalu Drábkovi, Ph. D. za odborné vedení, rady a připomínky při jejím zpracování.

### **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Nemám žádný závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 2. prosince 2019

.....

Podpis

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

## Fakulta dopravní

### Vliv změny časové polohy na řízení provozu

diplomová práce

prosinec 2019

Ladislav Roll

#### **ABSTRAKT**

Předmětem diplomové práce „Vliv změny časové polohy na řízení provozu“ je vývoj prototypu simulačního nástroje pro operativní řízení železniční dopravy, umožňující zkapacitnění úzkého hrdla železniční, vzniklého mimořádnou situací, dynamickou změnou časové polohy vlaků projíždějících postiženým úsekem. Výsledkem simulace jsou grafy jízd vlaků, jedoucích v jiném pořadí, než umožňují současné předpisy.

#### **ABSTRACT**

The subject of thesis „Influence of Change of Train Time Position on Operation Control“ is the development of a prototype of a simulation tool for the operative control of rail transport, enabling the bottleneck of a railway, caused by an emergency situation, to be increased by a dynamic change of the time position of trains passing through the affected section. The simulation results are graphs of train movements running in a different order than the current regulations allow.

#### **Klíčová slova**

Model, simulace, pohyb vlaků, časová poloha vlaků, pořadí jízdy, úzké hrdlo, kapacita úseku, čas průjezdu, svazkování.

#### **Key words**

Model, simulation, movement of trains, time position of trains, driving order, bottleneck, section capacity, transit time, bundling.

# Obsah

1	Seznam použitých zkratek.....	7
2	Úvod.....	8
3	Popis problematiky.....	9
3.1	Ideální svazkování.....	9
3.2	Suboptimální svazkování.....	10
3.3	Nevhodné svazkování.....	12
3.4	Vznik úzkého hrdla.....	12
3.5	Pravidla pro určení pořadí vlaků ve svazcích.....	13
4	Návrhy pro řešení mimořádných situací.....	17
4.1	Infrastrukturní změny.....	17
4.2	Změny ve využití kapacity stávající infrastruktury.....	17
5	Možnosti ověření funkčnosti navrhovaného řešení.....	20
5.1	Pohyb vlaku po koleji.....	20
5.2	Základní pohybové rovnice hmotného tělesa.....	24
5.3	Model.....	27
5.4	Dělení modelů z hlediska podstaty.....	27
5.4.1	Fyzický model.....	27
5.4.2	Grafický model.....	27
5.4.3	Matematický model – analytický.....	28
5.4.4	Matematický model - simulační.....	28
5.5	Dělení modelů z hlediska příchodu událostí.....	28
5.6	Dělení modelů z hlediska času.....	29
5.7	Dělení modelů dle dynamiky.....	29
5.8	Dělení modelů dle řízení.....	29
5.9	Volba modelovací metody.....	29
5.10	Požadavky na modelovaný traťový úsek.....	31
5.11	Volba zkoumaného úseku – možného úzkého hrdla.....	32
5.12	Grafické znázornění zkoumaného problému.....	33
6	Popis modelu.....	37
6.1	Systémové požadavky.....	37
6.2	Software.....	38

6.3	Databázové tabulky.....	38
6.4	Hlavní části simulačního SW.....	43
6.5	Inicializace simulace.....	43
6.6	Běh simulace.....	43
6.6.1	Hlavní cyklus.....	43
6.6.2	Stavění a zabezpečení vlakové cesty.....	44
6.6.3	Jízda vlaku.....	45
6.7	Ukončení simulace.....	48
6.8	Možnosti dalšího rozvoje simulátoru.....	48
6.9	Hnací vozidla použitá v modelu.....	48
6.10	Vlaky použité v modelu.....	49
6.11	Místa zastavení vlaků v modelu.....	50
6.12	Umístění návěstidel.....	50
6.13	Scénáře simulace.....	51
6.14	Výsledky simulací.....	52
6.15	Metodika vyhodnocení výsledků.....	101
6.16	Vyhodnocení výsledků.....	102
6.17	Návrh vlastních opatření.....	107
7	Závěr.....	108
8	Seznam použité literatury.....	109
9	Seznam příloh.....	110
9.1	Výpis zdrojových textů simulátoru.....	110
9.2	Struktury databázových tabulek.....	110



# 1 Seznam použitých zkratk

CPU	Central processor unit
DA	Dispečerský aparát
EC	EuroCity
GVD	Grafikon vlakové dopravy
HW	Hardware
JŘ	Jízdní řád
LAN	Local area network
Mn	Manipulační nákladní vlak
NEx	Nákladní expresní vlak
Os	Osobní vlak
PD	Provozní dispečer
Pn	Průběžný nákladní vlak
PND7	prováděcí nařízení k Předpisu pro operativní řízení provozu
R	Rychlík
RAM	Random acces memory
SJŘ	Sešitový jízdní řád
SSD	Solid state drive
SW	Software
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty, státní organizace
WAN	Wide area network
ZZ	Zabezpečovací zařízení

## 2 Úvod

Železnice byla a je v rámci dopravního systému moderní společnosti velmi důležitým druhem dopravy, jak v přepravě osob, tak i nákladu. Její důležitost a vytíženost se po společenských změnách v roce 1989 začala snižovat, což se mimo jiné projevilo zmenšováním počtu vlaků v síti a redukcí jejich přepravních kapacit.[4]

Pokles dopravních výkonů železnice v devadesátých letech minulého století vedl k řadě změn na infrastruktuře. Některé z nich se v pozdější době ukázaly kontraproduktivní, (snížení počtu staničních kolejí, zkrácení nástupišť), případně došlo k zanedbání rozvoje a údržby (nízké traťové rychlosti, chybějící moderní zabezpečovací zařízení).

V poslední době naopak vytížení železniční sítě narůstá. Zvyšuje se počet objednaných vlaků osobní dopravy a roste přepravní výkon i v nákladní dopravě. [4]

Tato situace, včetně zvyšování rozdílu rychlostí mezi osobní, hlavně dálkovou a nákladní dopravou, vede k vyčerpávání kapacit železniční sítě. Tato situace se bude patrně v budoucnosti podstatně zhoršovat. Důvodem je nejen atraktivita železnice pro cestující, ale vyplývá i ze závazků České republiky vůči EU, podle kterých má dojít do roku 2030 k přesunu 30% objemu nákladní dopravy ze silniční dopravy na železnici a do roku 2050 má být přesunuto dokonce 50% objemu. [15]

V běžném provozu, především při dobrém plánování GVD, jde tedy v současné době o zvládnutelný stav, ale nedostatek kapacity se projeví naplno v okamžiku, kdy na některém úseku tratě dojde ke vzniku mimořádné situace (porucha, nehoda, výluka apod).

Při výskytu takovýchto událostí by bylo vhodné mít k dispozici provozní nástroj, který by operativně napomohl najít rezervy v kapacitě úseku i za cenu některých dílčích omezení a změn v pořadí jízdy vlaků. Tento nástroj by však rozhodně neměl sloužit k plánování běžného provozu, případně generování JŘ a GVD.

Konstrukce prototypu takového nástroje a za jeho pomoci hledání v daný okamžik vhodného pořadí jízdy vlaků postiženým úsekem, aby byla maximálně využita jeho kapacita, je předmětem této práce.

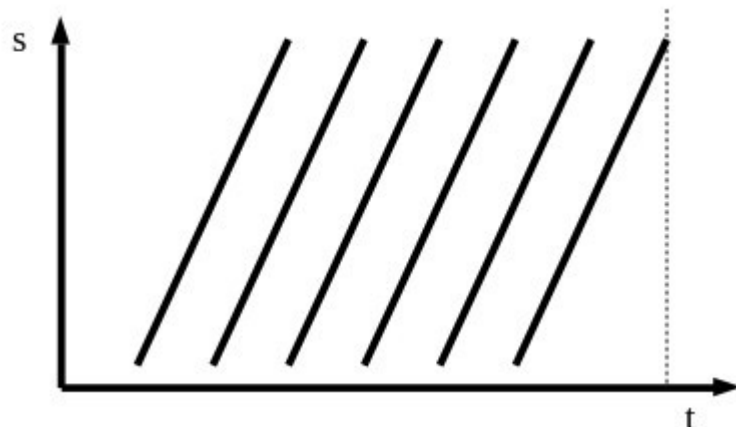
## 3 Popis problematiky

### 3.1 Ideální svazování

Každý systém má ideální stav, ke kterému se v realitě snažíme přiblížit. V případě propustnosti úseku železniční sítě tento stav nastává v okamžiku kdy:

1. Úsek tratě mezi dopravami s kolejovým rozvětvením je tvořen minimálně dvěma kolejemi, přičemž každá jedna je primárně určena pro jeden směr jízdy.
2. Maximální povolená rychlost na úseku je buď rovna nebo se přibližuje maximální rychlosti povolené v síti vůbec. V částech úseku nejsou velké rozdíly mezi povolenými rychlostmi v různých částech úseku, to znamená, že vlaky docilující v úseku maximální povolené rychlosti se nemusí často rozjíždět a brzdit.
3. Bod 2. je determinován i vhodným směrovým a sklonovým vedením trati.
4. Na úseku je instalováno moderní zabezpečovací zařízení s minimálními prodlevami ve stavění a zabezpečení vlakové cesty. Úsek je rozdělen do prostorových oddílů o rozumné délce – z toho plynou minimální následná mezidobí a maximální počet vlaků, které se pohybují v úseku.
5. Vlaky, projíždějící úsekem, jsou schopny v celé jeho délce dosahovat povolených rychlostí, případně se od nich jen minimálně odchylovat.
6. Všechny vlaky se v úseku pohybují zhruba stejnou rychlostí.

Z výše uvedeného je zřejmé, že ideální stav, především na železniční síti, kde není oddělena nákladní a osobní doprava, je nedosažitelný.



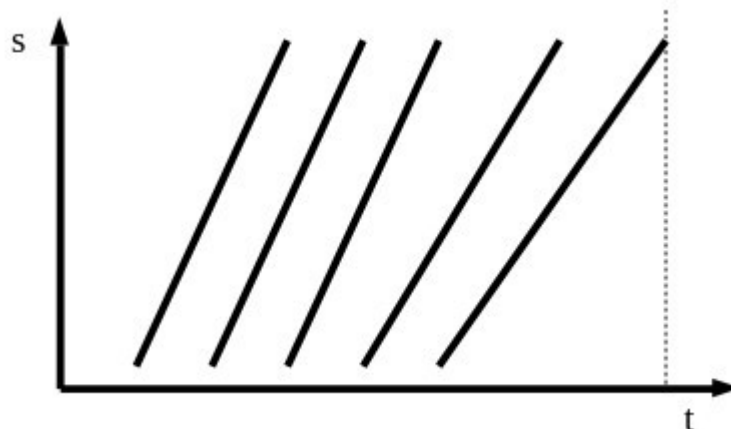
Obrázek 1: Trasy vlaků v úseku za jednotku času - ideální svazkování Zdroj: autor

Na obrázku 1 je vidět, že za jednotku času projede daným úsekem za jednotku času šest tras vlaků.[7]

### 3.2 Suboptimální svazkování.

Situace, popsaná v kapitole 3.1 je více či méně vzdálená realitě. Po síti se pohybuje mnoho rozdílných druhů vlaků, které se liší maximální povolenou rychlostí, dynamikou jízdy, délkou a, v případě vlaků osobní dopravy, počtem pravidelných (plánovaných) zastavení v úsecích mezi dopravami. Mix všech těchto vlaků výrazně snižuje počet provezených tras úsekem za jednotku času. Mnohem horší situace nastává na jednokolejných tratích, na kterých je potřeba v případě jejich větší vytíženosti, vlaky důkladně a s rozmyslem svazkovat, aby v časovém okně byla kapacita úseku využita na technické maximum za dodržení všech předpisů.

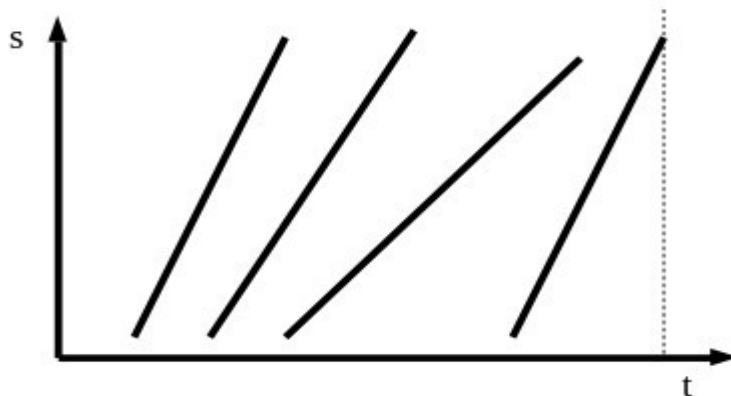
Obdobná situace, jako na jednokolejně trati, nastává v okamžiku, kdy na dvoukolejně trati dojde k výluce jedné traťové koleje. V případě plánované výluky je možno situaci řešit dopředu, například zrušením některých vlaků, výlukovým jízdním řádem, jízdou odklonem a podobně. Ovšem v případě neplánovaných výluk (nehoda, porucha) je zapotřebí provést co největší počet vlaků, aby nedošlo k zahlcení dopraven přiléhající k úzkému hrdlu na trati, případně dalších dopraven, sousedících s krajními dopravami postiženého úseku.



Obrázek 2: Trasy vlaků v úseku za jednotku času – suboptimální svazkování  
Zdroj: autor

Na obrázku 2 je znázorněna dobře řešená reálná situace, kdy vlaky s nejvyšší rychlostí projíždí úsekem jako první, za nimi vlak s nižší rychlostí a jako poslední, před opakujícím se cyklem v další časové jednotce, jede vlak s nejnižší rychlostí. Vidíme, že na rozdíl od obrázku 1, úsekem projede jen pět vlaků. Toto i s úspěchem využívá provoz v taktu, kdy mezi posledním vlakem v taktové periodě a prvním vlakem periody následující je v odjezdu z počáteční stanice delší interval zvolený tak, že poslední, pomalý vlak přijíždí do přední dopravní úseku tak, že nezdržuje první, rychlý vlak z následující taktové nebo časové periody. [7]

### 3.3 Nevhodné svazkování



Obrázek 3: Trasy vlaků v úseku za jednotku času – nevhodné svazkování  
Zdroj: autor

Na obrázku 3 je znázorněno velmi nevhodně zvolené vedení tras s ohledem na rychlost vlaků, kdy kapacita trati je nevyužita a dochází ke zdržování vlaků rychlejších vlaky pomalými. Za jednotku času projedou úsekem pouze čtyři trasy. [7]

### 3.4 Vznik úzkého hrdla

Do okamžiku, kdy provoz, byť i třeba špatně naplánovaný, není nějakým způsobem omezován, jsou vlaky provázeny pravidelně s určitými časovými odchylkami. Ty je možno různými technikami s menším či větším úspěchem eliminovat, aby nedocházelo k narůstání těchto časových diskrepancí tak, aby začaly ohrožovat provoz na určité části sítě. V případě, kdy dojde k omezení, ať plánovanému, (například pravidelná výluka pro údržbu), či neplánovanému, (například nehoda nebo porucha), dochází ke vzniku úzkého hrdla na trati.

### 3.5 Pravidla pro určení pořadí vlaků ve svazcích

Přes toto úzké hrdlo je zavedeno provázení vlaků svazkováním. To znamená, že vlaky jsou zastavovány a vyčkávají v dopravních přílehlých k hrdlu. Pořadí průjezdu vlaků je určováno podle vyhlášky 173/1995 Sb., v seznamu literatury [1], §22, odstavce 2), ve kterém jsou uvedena pravidla při zavedení operativního řízení dopravy v případě mimořádností v dopravě, takto, cituji:

- a) *nutné pomocné,*
- b) *mimořádné v obecném zájmu,*
- c) *expresní vlaky a rychlíky (včetně jízd lokomotiv a souprav pro tyto vlaky) s dovolenou rychlostí vyšší než 140 km/h, mezistátní nákladní expresní vlaky s dovolenou rychlostí vyšší než 100 km/h včetně a minimálním měrným trakčním výkonem 2,1 kW/1 hrt,*
- d) *expresní vlaky a rychlíky (včetně jízd lokomotiv a souprav pro tyto vlaky) s dovolenou rychlostí do 140 km/h včetně, mezistátní nákladní vlaky s dovolenou rychlostí vyšší než 100 km/h včetně a minimálním měrným trakčním výkonem 2,1 kW/1 hrt,*
- e) *spěšné,*
- f) *osobní,*
- g) *ostatní nákladní vlaky v pořadí:*
  - 1. *vnitrostátní expresní,*
  - 2. *ostatní nákladní,*
- h) *lokomotivní,*
- i) *služební a pracovní.*

V odstavci 3) §22 uvedené vyhlášky [1] je uvedeno řešení pořadí stejného druhu vlaků na základě velikosti zpoždění.

Předpis D1 SŽDC, v seznamu literatury [2], v člancích 2214. a 2215. upřesňuje obecná ustanovení z vyhlášky [1] takto, cituji:

*2214. V případě mimořádností v drážní dopravě (zpoždění vlaků, výluky kolejí, odklony vlaků pro nesjízdnost úseků tratí, odstranění následků mimořádných událostí apod.) zajišťuje provozovatel dráhy operativní řízení drážní dopravy podle předpisu SŽDC D7. Přitom zajišťuje, aby kapacity jednotlivých úseků dráhy pro organizování drážní dopravy byla maximálně využita např. použitím jízd vlaků ve sledu, a (vyjma případů uvedených ve článku 2215) zachovává přednost v jízdě vlaků, jimiž se rozumí:*

*a) nutné pomocné vlaky;*

*b) mimořádné vlaky v obecném zájmu;*

*c) expresní vlaky a rychlíky s dovolenou rychlostí vyšší než 140 km/h a mezistátní nákladní expresní vlaky, jimiž se rozumí:*

*1) expresní vlaky s dovolenou rychlostí vyšší než 140 km/h, včetně jízd lokomotivních vlaků a souprav pro tyto vlaky;*

*2) rychlíky s dovolenou rychlostí vyšší než 140 km/h, včetně jízd lokomotivních vlaků a souprav pro tyto vlaky;*

*3) mezistátní nákladní expresní vlaky s dovolenou rychlostí vyšší než 100 km/h včetně a minimálním měrným trakčním výkonem 2,1 kW/1 hrt;*

*d) ostatní expresní vlaky a rychlíky s dovolenou rychlostí do 140 km/h včetně, včetně jízd lokomotivních vlaků a souprav pro tyto vlaky a mezistátní nákladní vlaky, jimiž se rozumí:*

*1) expresní vlaky s dovolenou rychlostí do 140 km/h včetně, včetně jízd lokomotivních vlaků a souprav pro tyto vlaky;*

*2) rychlíky s dovolenou rychlostí do 140 km/h včetně, včetně jízd lokomotivních vlaků a souprav pro tyto vlaky;*

*3) mezistátní nákladní vlaky s dovolenou rychlostí vyšší než 100 km/h včetně a minimálním měrným trakčním výkonem 2,1 kW/1 hrt;*

*e) spěšné vlaky, včetně jízd lokomotivních vlaků a souprav pro tyto vlaky;*

*f) osobní vlaky, včetně jízd lokomotivních vlaků a souprav pro tyto vlaky;*



*g) ostatní vlaky nákladní dopravy (s výjimkou vlaků ve zbytkové kapacitě dráhy) v pořadí;*

- 1) vnitrostátní expresní;*
- 2) s přepravou cestujících;*
- 3) ostatní mezistátní;*
- 4) průběžné;*
- 5) soupravové [vlaky, které nejsou určeny pro jízdy vlaků osobní dopravy podle odrážky c), d), e), f) tohoto článku];*
- 6) manipulační;*
- 7) vlečkové;*

*h) lokomotivní vlaky;*

*m) služební vlaky;*

*n) vlaky ve zbytkové kapacitě dráhy.*

*Dopravce musí provozovateli dráhy prokazatelným způsobem oznámit, které lokomotivní a soupravové vlaky jsou určeny pro vlaky osobní dopravy podle odrážky c), d), e) a f) tohoto článku:*

- při tvorbě ročního jízdního řádu, včetně jeho změn zpracovateli jízdního řádu;*
- při žádosti o přidělení ad hoc trasy zpracovateli ad hoc trasy;*
- v ostatních případech (při mimořádnostech v dopravě) provoznímu dispečerovi.*

*Výpravčímu je tato skutečnost oznámena buď pomůckou GVD, kde jsou stanoveny technologické postupy u dotčených vlaků, nebo směnovým plánem.*

*Vlak jedoucí s náskokem nemá přednost před vlaky jedoucími včas a ani před zpožděnými vlaky. Toto ustanovení neplatí pro jízdy nutných pomocných vlaků a mimořádných vlaků v obecném zájmu. Provozní dispečer však může s ohledem na provozní situaci určit jinak, ale musí dodržet ustanovení o maximálním náskoku vlaku. U vlaků stejného pořadí o přednosti rozhoduje vyšší technická rychlost vlaků a dále případně větší hodnota zpoždění.*

2215. Při operativním řízení drážní dopravy provozovatel dráhy, pro maximální využití kapacity daného úseku dráhy, určí jiné pořadí důležitosti:

- a) s ohledem na provozní situaci, kdy je efektivnější upřednostnit vlak s nižším pořadím v případě, že má tento vlak vyšší technickou rychlost, než vlak s vyšším pořadím za těchto podmínek:
- vlak s vyšším pořadím bude veden v těsném sledu za vlakem s nižším pořadím (popř. za více vlaků s nižším pořadím jedoucích v těsném sledu za sebou) nebo
  - na obousměrně pojížděné traťové koleji bude vlak s vyšším pořadím veden ve sledu za vlakem s nižším pořadím před změnou směru jízdy vlaků (popř. za více vlaků s nižším pořadím jedoucích v těsném sledu za sebou);
- b) při jízdě vlaku odklonem, kdy se na odklonové trase zachovává druh vlaku z původní trasy vlaku;
- c) v případech stanovených PND7.

Technická rychlost ve smyslu článků 2214 a 2215 je rychlost vlaku vyplývající z jeho aktuálního řazení.

V předpisu SŽDC D7, v seznamu literatury uvedeno jako [3], se řízením provozu zabývá část číslo 4. Zde, v kapitole II - „Zásady řízení provozu“, článcích 217. - 219. jsou pokyny pro normální provozní situace, kdy pořadí vlaků odpovídá citovaným článkům z D1 [2]. V kapitole III - „Řízení provozu při předpokládaných výlukách“ je v článku 241. uvedeno, že v případě neexistence výlukového JŘ se pořadí vlaků řídí pravidly z předpisu D1 [2], jinak se pořadí vlaků řídí výlukovým JŘ. Odchytky jsou v kompetenci PD. V kapitole IV - „Řízení provozu při nepředpokládaných výlukách, poruchách ZZ a závadách na infrastruktuře“ se pořadím vypravovaných vlaků zabývá článek 258., ve kterém se uvádí, že za řízení provozu odpovídá výpravčí z příslušné dopravní spolu s PD, aby byla v maximální míře využita kapacita průjezdné koleje.

Nikde v uvedených kapitolách z předpisu D7 [3] ale není uveden způsob nebo postup, jak určit maximální míru využití koleje, což s největší pravděpodobností vede příslušné zaměstnance, kteří v danou chvíli organizují provoz v postiženém úseku, aby se striktně drželi uvedených zásad z předpisu D1 [2].

Jak tedy plyne z předchozího textu, předpisy hovoří o maximálním využití dostupné kapacity, k tomuto příkazu ale neexistuje jakákoli prováděcí metodika nebo nástroj, který by v daný krizový okamžik odpovědným provozním pracovníkům pomohl nalézt, kde se pro nastalou provozní situaci ono optimální maximum nalézá a tedy jaké pořadí vlaků by bylo, oproti normální, tedy naplánované situaci, vhodné zvolit při průjezdu úsekem s výpadkem kapacity.

## **4 Návrhy pro řešení mimořádných situací**

### **4.1 Infrastrukturní změny**

Pokud se nad stavem, nastíněným v kapitole 3.2, zamyslíme, logicky nám vyplyne nejjednodušší řešení, což jsou úpravy na infrastruktuře. Méně vytížené dvojkolejně tratě přebudovat na tříkolejně, více zatížené dvoukolejně, stejně tak naši jedinou tříkolejnou trať rozšířit na trať se čtyřmi kolejemi a zatížené jednokolejně tratě zdvojkolejnit. Všude dosadit autoblok, případně automatická hradla. Zoptimalizovat směrové parametry kolejí a pokud to bude proveditelné, optimalizovat i poměry sklonové, to znamená trať vést v tunelech, zářezech a mostech.

Toto, na první pohled jednoduché řešení, naráží na několik zásadních úskalí. Je nesmírně drahé, časově náročné a v budoucnosti, v případě přelivu přepravních proudů do jiných směrů hrozí i riziko nevyužití vybudované infrastruktury. Toto konstatování ovšem nemá být v žádném případě odmítání infrastrukturních úprav v místech železniční sítě, kde je to skutečně zapotřebí.

### **4.2 Změny ve využití kapacity stávající infrastruktury**

Další způsob, jak řešit nedostatečnou kapacitu, je maximální využití stávající infrastruktury optimalizací pořadí vlaků na základě okamžitého provozního stavu v dotčené části sítě.

Základní úvaha nad řešením respektive metody pro řešení zvýšení propustnosti úzkého hrdla na trati je následující:

Pokud je vhodně zvolena časová poloha vlaku pro průjezd úzkým hrdlem, který má podle současných pravidel nižší prioritou, ale má srovnatelné dynamické a/nebo rychlostní parametry s vlakem, který má v současnosti vyšší prioritou, pak jeho odjezd na trať před vlakem s vyšší prioritou by mohl (paradoxně) vést ke zvýšení propustnosti úseku (hrdla).

Uvažujme tedy následující situaci:

- Mezi dopravami A (zadní) a B (přední), které leží na dvoukolejně trati, probíhá výluka jedné traťové koleje – vlaky se tedy při průjezdu mezi stanicemi svazkují.
- V úseku mezi dopravami jsou čtyři zastávky, kde pravidelně zastavují Os.
- Průměrná traťová rychlost v úseku je 155 km/h.
- V dopravě A čekají na průjezd do dopravy B vlaky EC, R, Os, Sv a Pn. Jejich rychlostní parametry jsou uvedeny v tabulce 1.
- Odjezdová zhlaví obou dopravníků umožňují odjezd, respektive příjezd z/na průjezdné koleje traťovou rychlostí, odbočkou je rychlost omezena na 60km/h.

Tabulka 1: Parametry vlaků vstupujících do úseku

Druh vlaku	$v_{\max}$ vlaku [km/h]	$v_{\text{prům}}$ v úseku [km/h]
Ex	160	155
R	140	140
Os	140	72
Pn	100	100
Mn	80	80

Podle pravidel, zavedených při operativním řízení drážní dopravy v případě mimořádností platných v současnosti podle [1], [2] a [3], vlaky pojedou v následujícím pořadí :

1. Ex
2. R
3. Os
4. Pn
5. Mn

Z tabulky 1 vyplývá, že Mn bude s největší pravděpodobností omezován Os a Pn, který má nejvyšší rychlost  $v_{\text{prům}}$  bude v úseku vzdálen od svého rychlostního optima. Kromě toho časové okno pro průjezd z A do B se po odjezdu Pn uzavře, takže Mn již neprojde a bude muset čekat v zadní dopravě A na opětné otočení směru svazkovaného průjezdu z A do B.

Důsledkem je, menší počet vlaků, které projedou mezi dopravami a také nebezpečí hromadění vlaků v zadní dopravě A .

Navrhované řešení zohledňuje nejen pořadí vlaků, dané předpisy a pravidly dle literatury uvedené v předchozím odstavci, ale i jejich technické možnosti, kdy, změní-li časovou polohu průjezdu některého z vlaků s nižší prioritou úzkým hrdlem, mohou zvýšit počet provezených vlaků úzkým hrdlem, a to i za cenu malého zpoždění ostatních vlaků. Zpožděním postižené vlaky na trase jízdy, pokud je dostatečně dlouhá, případně při obratu, jej mohou eliminovat.

Tedy, podle pravidel a operativních změn na základě parametrů, vlaky pojedou v následujícím pořadí:

1. Ex
2. R
3. Pn
4. Os
5. Mn

Pořadí prvních dvou vlaků se nemění. Jako třetí tedy odjíždí do úzkého hrdla Pn, který sice nemá podle současných pravidel dostatečný měrný výkon, ale jeho maximální rychlost je dostatečná na to, aby se ve zkoumaném úseku vzdálil Os, který odjíždí ze zadní dopravy A v nejkratším následném mezidobí za Pn do B. Jako poslední tedy jede Mn, jehož rychlost je jen o málo vyšší, než rychlost Os.

Výsledkem by mělo být, za cenu mírného zpoždění Os, které může dohnat při případném obratu v dopravě B, případně krácením jízdních dob při pokračování v jízdě, nárůst počtu vlaků za srovnatelnou jednotku času úzkým hrdlem.

## 5 Možnosti ověření funkčnosti navrhovaného řešení

Každý myšlenkový konstrukt, či teorii je nutno nějakým způsobem ověřit a potvrdit nebo vyvrátit, včetně závěrů z nich vyplývajících. V podstatě existují dva způsoby, jak ověřit navrhovaná řešení:

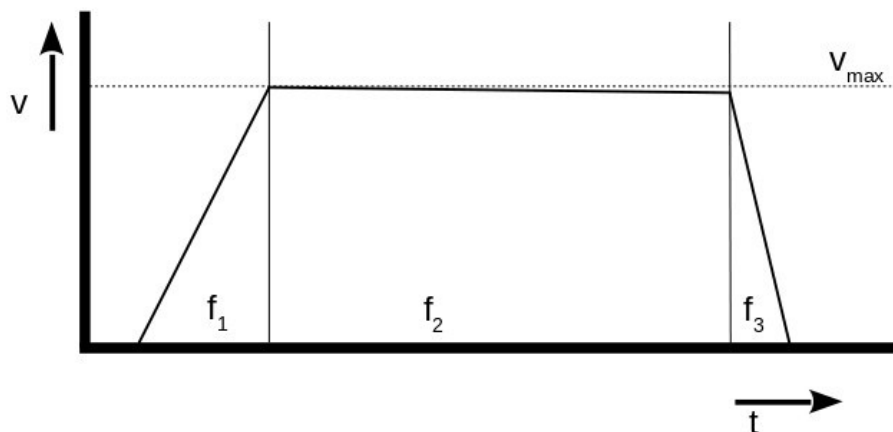
- experiment s reálným systémem,
- model reálného systému.

Je zřejmé, že experimenty lze provádět jen na omezeném okruhu systémů, mezi které železniční dopravní síť rozhodně nepatří. Hypotézu je tedy nutno ověřit modelací systému.[8]

### 5.1 Pohyb vlaku po koleji

Abychom byli vůbec schopni modelovat systém, musíme si uvědomit, jak se základní jednotka modelu, tedy vlak na koleji, vlastně chová z hlediska matematiky a fyziky.

Základním stavebním kamenem modelu je popis dráhy a rychlosti vlaku v traťovém úseku v závislosti na čase. Poloha vlaku je závislá na rychlosti, kterou se vlak pohybuje, zrychlení/zpomalení, kterým vlak měnil rychlost a časovém okamžiku, ve kterém pohyb vlaku zkoumáme.



Obrázek 4: Zjednodušený graf jízdy vlaku

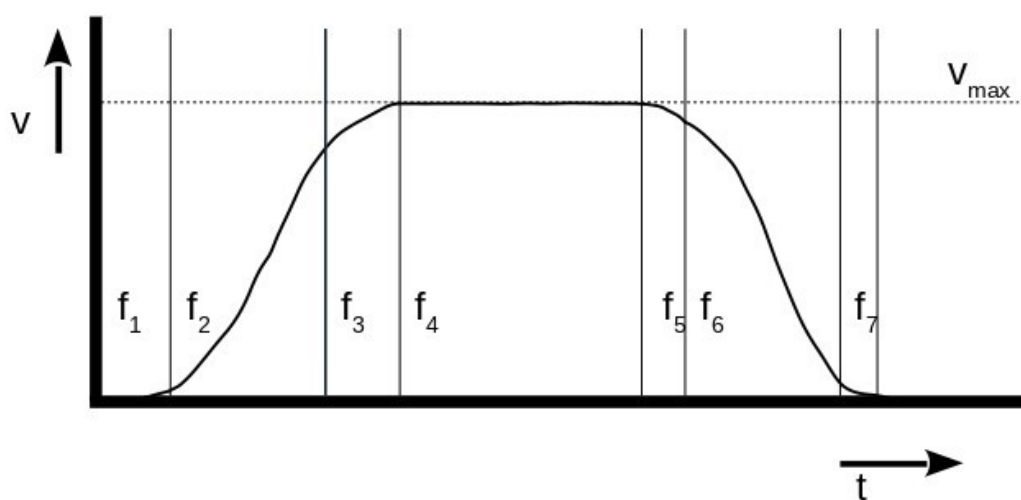
Zdroj: Autor

Nejjednodušším popisem v modelu je situace, znázorněná na obrázku 4, kdy vlak akceleruje s konstantním zrychlením, jedná se tedy o pohyb rovnoměrně zrychlený až do dosažení rychlosti  $v_{max}$  a to buď úsekovou nebo technickou, na obrázku 4 je to fáze jízdy  $f_1$ .

Rychlost je naopak snižována s konstantním záporným zrychlením, tedy pohybem rovnoměrně zpomaleným a to buď na novou  $v_{\max}$  nebo do zastavení, na obrázku 4 fáze  $f_3$ .

Mezi změnami rychlosti se vlak pohybuje rovnoměrným pohybem, čili jeho rychlost je konstantní. Na obrázku 4 je to fáze  $f_2$ .

Ve skutečnosti zrychlení/zpomalení vlaku není konstantní a záznamem rychlosti je křivka, jak je zobrazeno na obrázku 5.



Obrázek 5: Skutečný graf jízdy vlaku

Zdroj: literatura[12]

Důvodem vzniku křivky na obrázku 5 je technika vedení vlaku na základě fyzikálního chování vlakové soupravy, kterou si lze představit jako velmi dlouhé, pružné těleso s omezenou pevností v tahu.

Nelze se tedy rozjíždět z nulové rychlosti plnou tažnou silou<sup>1</sup> hnacího vozidla/vozidel, neboť by v soupravě došlo k silovým rázům a ke skluzu hnacího vozidla. Tyto rázy by minimálně působily diskomfortně na cestující ve vlaku osobní dopravy a v případě nákladního vlaku by mohlo dojít poškození nákladu. V krajním případě by mohlo dojít k přetržení vlaku nebo poškození spřáhlového ústrojí vozidel v soupravě. Z toho důvodu musí být tažná síla do určité rychlostní hranice minimální a zvyšována velmi pozvolně.

1 Vzhledem k tomu, že v dnešní době ne každé vedoucí vozidlo vlaku musí být zároveň hnacím a existují tedy soupravy s distribuovaným pohonem, případně s uspořádáním pohonu push-pull, nemusí být síla, která urychluje soupravu nutně tažná z fyzikálního hlediska. Ovšem pro určitou zavedenost tohoto pojmu a jednoduchost se bude v této práci označovat jako tažná síla.

Za tuto hranici můžeme považovat rychlost 5-10 km/h, velmi záleží na druhu vlaku, řazení soupravy, její hmotnosti, parametrech hnacího vozidla, povětrnostních a adhezních podmínkách atd. V grafu na obrázku 5 je to oblast  $f_1$ .

Od této rychlostní hranice může být rychlost zvyšována s maximální tažnou silou a tedy maximálním potřebným zrychlením, které je omezeno výkonem hnacího vozidla, adhezními podmínkami a sklonovými poměry na trati. Je samozřejmé, že ne vždy, například při dostatečně dlouhých jízdách, musí být toto zrychlení maximální možné. Se stoupající rychlostí vlaku rostou jízdí odpory soupravy a tažná síla hnacího vozidla od určité rychlosti, dané jeho parametry, začíná klesat. To je důvod, proč se zrychlení s růstem rychlosti snižuje. V grafu na obrázku 5 je to oblast  $f_2$ .

V okamžiku, kdy se skutečná rychlost začíná přibližovat  $v_{max}$ , je tažná síla hnacího vozidla záměrně postupně snižována, aby nedošlo k překročení  $v_{max}$ . Náhlý pokles tažné síly při dosažení  $v_{max}$  by způsobil silové rázy se podobnými důsledky, jako v případě necitlivého rozjezdu. V grafu na obrázku 5 je to oblast  $f_3$ .

Po dosažení  $v_{max}$  skutečná rychlost vlaku osciluje pod touto hranicí, případně lehce klesá (jízda výběhem). V grafu na obrázku 5 je to oblast  $f_4$ .

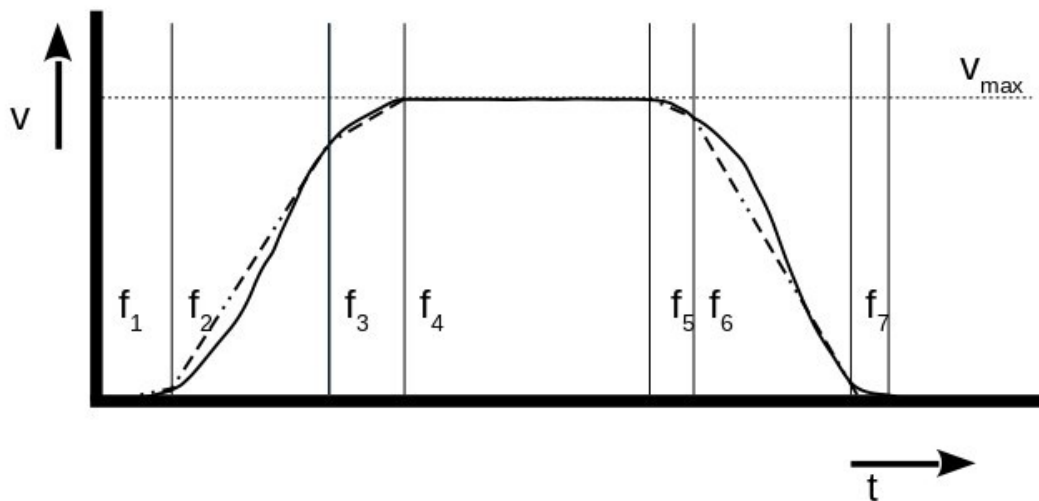
Zpomalení vlaku probíhá opačně, kdy se projevívá nástup brzděného účinku. Rychlost zvyšování tohoto účinku záleží především na druhu vlaku, technické prodlevě brzd a délce vlaku. Záporné zrychlení by mělo narůstat povlovně, aby nedošlo k rázům ve vlaku se všemi důsledky, případně u špatně svěřené a dlouhé soupravy by mohlo dojít i vyšínutí vozů. V grafu na obrázku 5 je to oblast  $f_5$ .

S klesající rychlostí vlaku se snižují jeho jízdí odpory a roste účinek brzd. V grafu na obrázku 5 je to oblast  $f_6$ .

Pokud vlak pouze snižuje rychlost na jinou  $v_{max}$  je nutno odbrzdit soupravu ještě před poklesem na tuto rychlost (opět záleží na způsobu brzdění a délce soupravy), případně při úplném zastavování vlaku je dobré před zastavením provést lehké snížení brzděného účinku. V grafu na obrázku 5 je to oblast  $f_7$ .

Pro všechny fáze jízdy, kromě fáze  $f_7$ , kterou pro účely modelu můžeme zcela zanedbat, je možno křivky v nich obsažené aproximovat částmi přímk s vhodnými sklony, vyjadřujícími zrychlení nebo zpomalení vlaku. Fázi jízdy  $f_4$  pak nahradíme přímkou se sklonem 0 při jízdě pod výkonem, případně s velmi malým záporným zrychlením, což odpovídá jízdě výběhem.



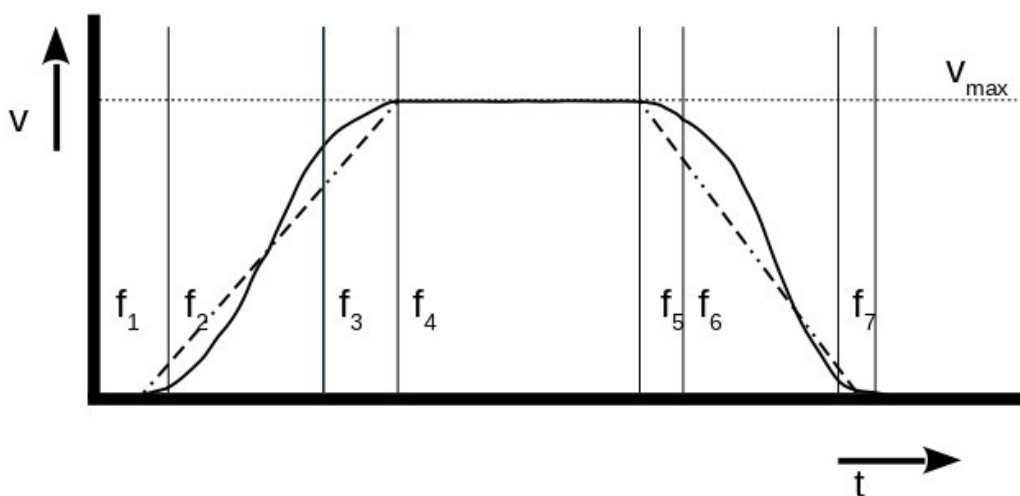


Obrázek 6: Aproximace fází jízdy vlaku přímkami

Zdroj: Autor

Výsledek aproximací jednotlivých fází křivky jízdy pomocí přímek je znázorněn na obrázku 6.

Naskýtá se tedy otázka, zdali aproximace z obrázku 5 by tedy nešla ještě zjednodušit, tak, jak je naznačeno na obrázku 7, neboť to by logicky vedlo ke snížení výpočetní náročnosti .



Obrázek 7: Zjednodušená aproximace fází jízdy vlaku přímkami

Zdroj: Autor

Po zjednodušení dostaneme graf jízdy vlaku naprosto totožný s obrázkem 4. Pokud by ale bylo použito chování z obrázku 7 s větším zjednodušením fází jízdy, je zřejmé, že při nevhodně zvolených aproximačních přímkách, především rozjezdové, dojde k poměrně značnému zkreslení jízdy vlaku.[9][10][11]

## 5.2 Základní pohybové rovnice hmotného tělesa

Pohyb vlaku po trati budeme zkoumat z pohledu klasické mechaniky a dynamiky, což jsou vlastně Newtonovy zákony. Pro zjištění polohy a rychlosti v závislosti na čase využijeme především první a druhý Newtonův zákon:

1. Zákon setrvačnosti: Těleso setrvává v klidu nebo rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud na něj nepůsobí silou jiné těleso .
2. Zákon síly: Okamžité zrychlení tělesa je přímo úměrné působící síle.

Matematický zápis 2. Newtonova zákona jako vektorová rovnice:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (1)$$

Tuto vektorovou rovnici můžeme rozepsat do vektorových souřadnic:

$$F_x = m \cdot a_x = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2)$$

$$F_y = m \cdot a_y = m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2}$$

$$F_z = m \cdot a_z = m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2}$$

Vzhledem k tomu, že u vlaku můžeme působení sil v osách y a z v našem modelu naprosto zanedbat a sílu v ose x, působící na soupravu, můžeme považovat za konstantu co do velikosti i směru, můžeme vektory síly z (1) a průvodiče zapsat v následující formě:

$$\vec{F} = (F_x, 0, 0) = (F, 0, 0) \quad (3)$$

$$\vec{r} = (x, 0, 0) = (s, 0, 0)$$

Pak i vektory rychlosti a síly mají směr osy x:

$$\vec{v} = (v_x, 0, 0) = (v, 0, 0) \quad (4)$$

$$\vec{a} = (a_x, 0, 0) = (a, 0, 0)$$

Výsledkem je pouze jediná nenulová pohybová rovnice ze soustavy (2) a to pro osu x:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x \quad (5)$$

Pokud tedy využijeme zápis rovnic ze soustavy (2) můžeme rovnici (5) rozepsat:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = m \cdot a = m \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} = F_x = F \quad (6)$$

Zrychlení je derivace rychlosti:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

a je konstantní:

$$a = \frac{F}{m} = konst. \quad (8)$$

Rychlost můžeme tedy vypočítat pomocí neurčitého integrálu zpětnou integrací (7) :

$$v = \int a + C_1 \quad (9)$$

Jak je zmíněno v (8), zrychlení je konstantní, takže integrál (9) můžeme zapsat:

$$v = \int a + C_1 = a \cdot \int 1 + C_1 = a \cdot t + C_1 \quad (10)$$

Vztah (10) platí univerzálně pro pohyb hmotného tělesa. Integrační konstanta  $C_1$  umožňuje specifikovat tuto rychlost pro konkrétní podmínky pohybu – tzv. okrajové podmínky řešené úlohy. V případě pohybové rovnice jsou to podmínky, stanovující pro počátek sledované dráhy konkrétní hodnoty sledovaných veličin:

- Počáteční čas  $t_0$ .
- Počáteční rychlost  $v_0$ , tj rychlost v počátečním čase  $v_0 = v(t_0)$ .
- Počáteční dráhu  $s_0$ , tj dráhu v počátečním čase  $s_0 = s(t_0)$ .

Integrační konstantu určíme jako rychlost v čase  $t_0$ , načež okamžitě získáme:

$$C_1 = v_0 \quad (11)$$

Čili ze vztahu (10) a (11) dostaneme známý středoškolský vztah pro rychlost rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu:

$$\boxed{v = a \cdot t + v_0} \quad (12)$$

Nyní ještě musíme odvodit vztah pro dráhu pohybu tělesa. Rychlost pohybu můžeme zapsat jako derivaci dráhy podle času:

$$v = \frac{ds}{dt} = a \cdot t + v_0 \quad (13)$$

Dráhu tedy můžeme vypočítat jako integrál rychlosti:

$$s = \int v + C_2 = \int (a \cdot t + v_0) + C_2 \quad (14)$$

Výsledkem integrace z rovnice (14) je vztah [5]:

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + C_2 \quad (15)$$

Integrační konstantu  $C_2$  stanovíme vložením okrajové podmínky – dráhy v čase  $t = 0$  do vzorce pro dráhu (15), kdy dostaneme:

$$C_2 = s_0 \quad (16)$$

Po dosazení hodnoty  $C_2$  z (16) do vztahu (15) dostáváme vzorec pro dráhu rovnoměrně zrychleného pohybu:

$$s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0 \quad (17)$$

Pro vyjádření vztahu pro výpočet dráhy rovnoměrného pohybu, stačí ve vztahu (17) hodnotu zrychlení položit  $a = 0$ , čímž obdržíme:

$$s = v \cdot t \quad (18)$$

Vztahy, uvedené v této kapitole pro popis pohybu jsou naprosto dostačující tuto práci, neboť v modelu bude uvažován pouze pohyb tělesa rovnoměrně zrychlený/zpomalený, a pohyb rovnoměrný, především přihlédneme-li k poměru iteračního intervalu vůči době pohybu vlaku. Vzhledem k rozměrům a chování vlaku je možno v modelu zanedbat i silové působení v osách  $y$  a  $z$ . [5]

## 5.3 Model

Model můžeme definovat jako abstraktní reprezentaci určitého reálného systému, která slouží k jeho pochopení. Aby byl model realizovatelný, některé části skutečného systému, které pro vysvětlení a zkoumání jeho chování nejsou zcela podstatné nebo jsou příliš složité, v modelu buď úplně zanedbáme, případně zjednodušíme. [8]

K jednomu reálnému systému nemusí existovat pouze jeden model. Naopak, pro pochopení zákonitostí chování odlišných částí systému, můžeme pro každou takovou součást vytvořit odlišný model, případně modely systému mohou mít odlišné rozlišení detailu.

Model je tedy zjednodušený popis reality, ovšem toto zjednodušení je takového rázu, aby byl ještě schopen realitu dostatečně věrně schopen a naopak jeho výsledky, použité ve skutečném provozu, poskytovaly vhodné odezvy a přínosy.

## 5.4 Dělení modelů z hlediska podstaty

Modely můžeme rozdělit z mnoha hledisek, které se pak v praxi prolínají a doplňují. Tvůrce modelu, na základě reality systému, který se snaží namodelovat, vybírá jednotlivá hlediska tak, aby model i při nutném zjednodušení, tuto realitu co nejméně popsal.

### 5.4.1 Fyzický model

Fyzický model, jak již jeho název napovídá, využívá zmenšení subjektů modelu ve zvoleném měřítku vzhledem k realitě. Vzhledem k jisté náročnosti výroby a velmi často k jednoúčelovosti modelu může být využit pro řešení jednoho konkrétního, nepříliš rozsáhlého systému, kde dochází ke zkoumání stále se opakující situace s různými vstupními podmínkami. Případně je vhodný pro demonstrační nebo výukové účely.[8]

### 5.4.2 Grafický model

Grafický model je založen na vynášení chování subjektů v systému do 2D grafů, buď na papíře či pomocí výpočetní techniky. Způsob modelace je sice nenáročný na technické prostředky, ale hodí se pouze na malý počet subjektů v systému. Ovšem výsledek grafického modelu může být použit jako základ či představa pozdějšího matematického nebo jako základ analýzy algoritmického řešení, případně pro demonstrační nebo výukové účely.[8]

### 5.4.3 Matematický model – analytický

Analytický matematický model používá k popisu chování subjektů v systému soustavu matematických rovnic. Do určité složitosti systému je zvládnutelný současnými prostředky v rozumném čase. Pokud jsme schopni systém analyticky popsat, dává tento model nejpřesnější výsledky. V případě dobře navrženého modelu, může být model s úspěchem použit na obecnou modelaci různých systémů podobného typu, kdy dochází pouze ke změně popisu systému a podmínek jeho existence.[8]

### 5.4.4 Matematický model - simulační

Simulační modely se využívají pro řešení systémů především v případech, kdy:

- nemáme k dispozici analytický popis systému,
- systém je dynamický a nelineární,
- systém nelze analyticky buď vůbec nebo jen obtížně popsat,
- řešení analytickými metodami by řešení trvalo neúměrně dlouho, či by bylo velmi náročné na zdroje.

Výsledky simulace jsou závislé na kvalitě modelu a často pouze přibližné. Pro řešení využívají numerické výpočetní metody a začaly se využívat s rozvojem výpočetní techniky, především s nárůstem její hrubé výpočetní síly.[8]

## 5.5 Dělení modelů z hlediska příchodu událostí

- Do deterministického modelu přicházejí události pravidelně, v určitých časových odstupech. Stačí tak vyřešit model pro jednu událost a výsledek můžeme aplikovat na všechny ostatní události se stejnými vstupními podmínkami. Tentýž postup aplikujeme pro jiné vstupní podmínky modelu.[8]
- Do stochastického modelu přicházejí události nepravidelně, tedy náhodně s určitým pravděpodobnostním časovým rozdělením. Model pak musíme řešit tak, abychom obsáhli celé reálné možnosti příchodu událostí, včetně změn vstupních podmínek.[8]

## 5.6 Dělení modelů z hlediska času

- Spojité modely pracují s časem jako s nepřerušným kontinuem. Tyto modely jsou vhodné pro navrhování základních řešení a teoretický výzkum, ovšem příliš se nehodí pro popis a řešení reálných systémů. [8]
- V diskrétním modelu je čas rozdělen na intervaly o pravidelné délce trvání. Granularita rozdělení je většinou závislá na dynamice vývoje systému a jeho rozsáhlosti. Nejčastěji se využívá rozdělení času na sekundy či minuty, ale v případě velmi dynamických systémů se použijí vhodné menší jednotky, než sekundy nebo naopak, v případě malé dynamiky systému resp. modelu můžeme použít hodiny či dokonce dny.[ 8]

## 5.7 Dělení modelů dle dynamiky

- Ve statickém modelu nedochází po celou dobu jeho existence k žádným změnám, ani na základě toku času či příchodu událostí do systému. Z hlediska modelování jsou tyto modely nezajímavé.[8]
- Stav dynamických modelů se mění o určité hodnoty. Změna nastává buď na základě toku času v modelu nebo příchodu události do systému, která je pro model signifikantní.[8]

## 5.8 Dělení modelů dle řízení

- Stav modelu řízeného časem se mění v závislosti na jeho dynamice a toku času. Pokud se tedy čas zastaví, tento model se stává statickým.[8]
- Stav modelu řízeného událostmi se mění na základě příchodu události (jedné nebo více) do systému. Bez vstupních událostí, které mění stav, se model stává statickým. [8]

## 5.9 Volba modelovací metody

Z předchozích kapitol máme již dostatek dostatek informací, jaké možnosti pro řešení jsou k dispozici a tyto možnosti je nutno použít pro návrh modelu zkoumaného systému.

Fyzický model můžeme pro jeho složitost a nepraktičnost ihned vyloučit. Grafický model je možno použít pro první znázornění problému a vizualizaci představy chování vlaku po dráze

pohybu v závislosti na čase, ale pro skutečnou modelaci v případě složitějšího systému je také nevhodný.

Analytický model je pro řešení zkoumaného systému také nevhodný, neboť popsat jízdu vlaku v čase matematickými funkcemi s velkým (a často velmi těžko kvantifikovatelným) počtem proměnných v reálném, respektive rozumném čase je téměř nemožné, obzvlášť bude-li použita pro řešení běžná výpočetní technika.

Model bude tedy simulační, kdy části křivky, popisující pohyb vlaku v čase, budou nahrazeny vhodně zvolenými lineárními funkcemi.

Vzhledem k tomu, že jízda vlaku se počítá na desítky až tisíce sekund, může být v modelu použit diskretní čas s vhodnou granularitou. Ten se pak jeví, z hlediska délky simulace, jako spojitý.

Protože vlaky se pohybují podle přesně daných pravidel a vyloučíme-li v případě zkoumaného systému velmi málo pravděpodobné mimořádné jevy (porucha, nehoda), model bude deterministický.

Čas se v modelu mění, a události jsou závislé na jeho průběhu. Z toho plyne, z hlediska řízení modelu a jeho dynamiky, že model bude dynamický a řízený časem.

Model bude tedy:

- simulační,
- deterministický,
- s diskretním časem,
- dynamický,
- časem řízený.



## 5.10 Požadavky na modelovaný traťový úsek

Aby model měl vypovídací hodnotu, dostatečnou obecnost a tím pádem případnou využitelnost na vícero místech železniční sítě a přitom aby odpovídal rozsahu této práce, je třeba úzké hrdlo zvolit mezi dvěma dopravními, nejlépe s těmito kritérii:

1. Dvoukolejná trať, vysoká povolená traťová rychlost v úseku.
2. Minimální možná následná mezidobí při odjezdech vlaků ze zadní dopravní, trať vybavena automatickým blokem.
3. Velmi rozmanitá skladba tras vlaků, projíždějících úsekem.
4. Výrazné rozdíly mezi povolenými maximálními rychlostmi vlaků projíždějících úsekem.
5. V jedné z dopravní, která přiléhá ke zkoumanému úseku by mělo docházet k obrátům některých souprav (vlaků), zatímco jiné vlaky pokračují dále.
6. Ve zkoumaném úseku by měl být přiměřený počet zastávek vlaků osobní dopravy, cca 3 - 4.

ad 1. Pokud dojde k mimořádné události na tříkolejně trati, přejde provoz do dvoukolejného režimu, kdy vznik úzkého hrdla a svazkování nemá takový vliv na propustnost (sníží se o cca jednokolejnou trať). U jednokolejné trati je svazkování již pokud možno zohledněno v pravidelném GVD (což ovšem nehovoří o tom, zda je kapacita trati využita optimálně) a v případě mimořádnosti je provoz zastaven zcela.

ad 2. V případě dlouhých následných mezidobí při odjezdech vlaků ze zadní dopravní, dlouhých prostorových oddílů řízených ručně vstupuje do procesu lidský prvek (několik), který může zkoumání problému svojí vnesenou chybou zcela znehodnotit.

ad 3. Rozmanitost skladby je důležitá z důvodu uplatňování co nejvíce pravidel souvisejících s řízením provozu a přednostech vlaků podle souvisejících citovaných částí z [1], [2], a [3].

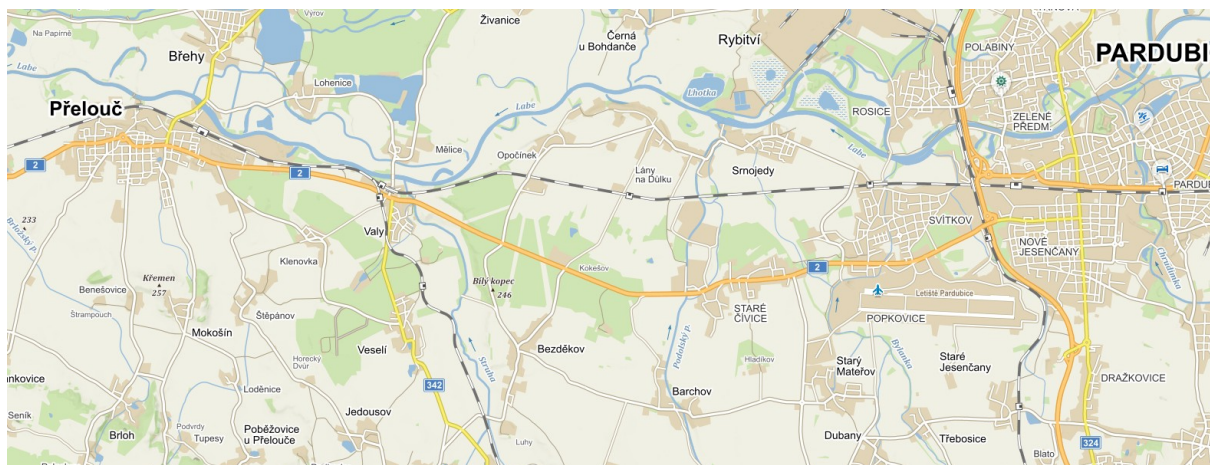
ad 4. Tento bod souvisí i s bodem 3. kdy i vlaky s vyšší prioritou mohou mít nižší maximální rychlost, než vlaky s prioritou nižší. Stejně tak může přinášet problémy vlak s vysokou rychlostí, ale nevhodnými dynamickými parametry.

ad 5. Obrat některých vlaků osobní dopravy může také napomoci rozhodování. Pokud je na obrat vyčleněn dostatečný časový interval, může být, za dodržení bezpečnostních a případně pracovních předpisů zkrácen, čímž je eliminováno zpoždění vlaku na příjezdu. Případně tento vlak může anulovat zpoždění po obratu a odjezdu krácením jízdních dob, ovšem umožňuje-li to konstrukce JŘ. Vlaky, které pokračují dále z přední dopravní, mohou eliminovat zpoždění stejným způsobem.

ad 6. Vlak osobní dopravy projíždějící úsekem a pravidelně zastavující na zastávkách má většinou i v případě vysoké maximální povolené rychlosti a dostatečných dynamických kvalitách poměrně nízkou skutečnou (průměrnou) rychlost v úseku, což může vést ke zdržování ostatních vlaků, které jej následují. Uvedený počet zastávek odpovídá průměru v ČR mezi dopravními s kolejovým rozvětvením. Pro malý nebo nulový počet zastávek v mezistaničním úseku, kdy osobní vlak dosahuje vysoké průměrné rychlosti, není důvod tento problém zkoumat, případně výsledky zkoumání nebudou mít dostatečnou vypovídací hodnotu.

## 5.11 Volba zkoumaného úseku – možného úzkého hrdla

Pro volbu úzkého hrdla bylo tedy třeba najít úsek, který by odpovídal požadavkům z kapitoly 5.10. Rozborem provozu na hlavních tratích v GVD byl na základě kritérií vybrán úsek Přelouč – Pardubice, který posloužil jako vzor simulačního úseku.

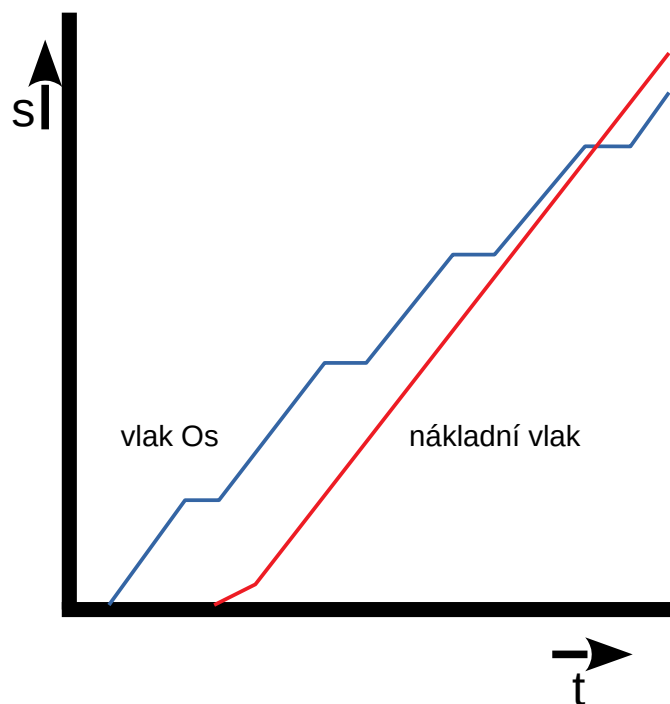


Obrázek 8: Zobrazení zkoumaného úseku v mapě

Zdroj: [www.mapy.cz](http://www.mapy.cz)

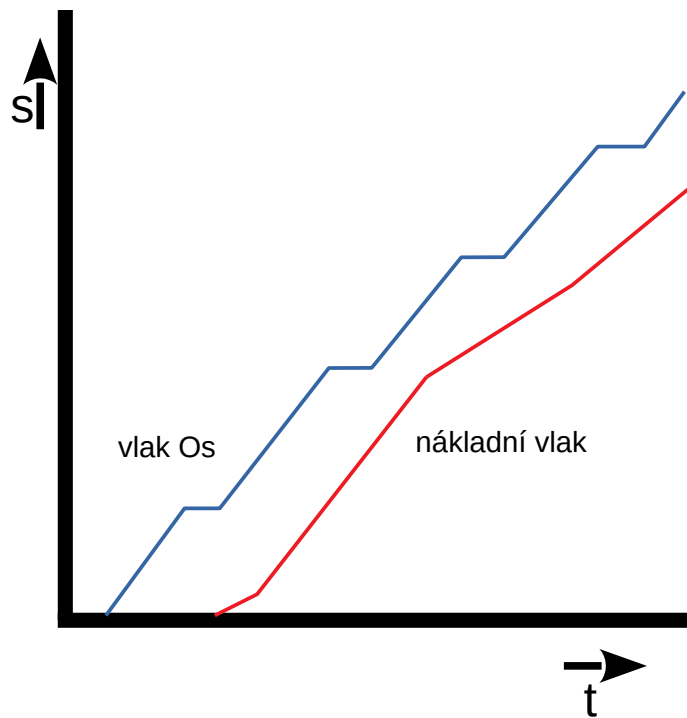
## 5.12 Grafické znázornění zkoumaného problému

Na obrázku 9 je graficky znázorněna předpokládaná dráha dvou vlaků s parametry, které byly uvedeny v kapitole 4.2. Samozřejmě se jedná o situaci, kdy jeden vlak není omezován druhým, tedy kdy každý jede po jedné traťové koleji. Tyto vlaky jedou podle pravidel odjezdu z počáteční dopravní v pořadí, které jsou platná v současnosti. Nákladní vlak je zbytečně omezován před ním jedoucím vlakem Os, zastavujícím ve všech zastávkách v úseku a dojíždí jej na vzdálenost cca jednoho návěstního oddílu, což je vidět na obrázku 10. To způsobí nejen časovou ztrátu, ale i ztrátu ekonomickou, kdy dochází k opakovanému brzdění a rozjezdům vlaku<sup>2</sup>.

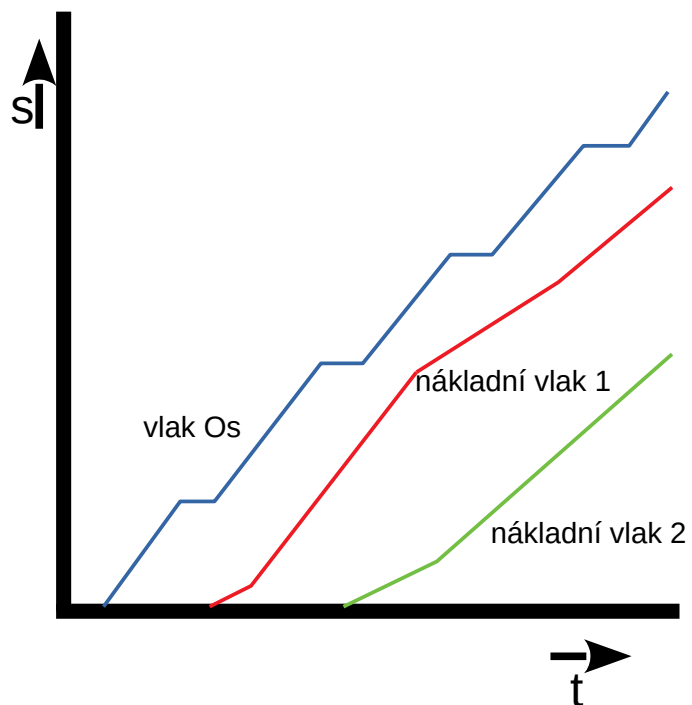


Obrázek 9: Znázornění jízdy dvou vlaků – současnost  
Zdroj: Autor

<sup>2</sup> Zde velmi záleží na zkušenosti strojvedoucího, kdy vhodným přizpůsobením rychlostí jím řízeného vlaku může tyto negativní vlivy omezit na minimum.[11]



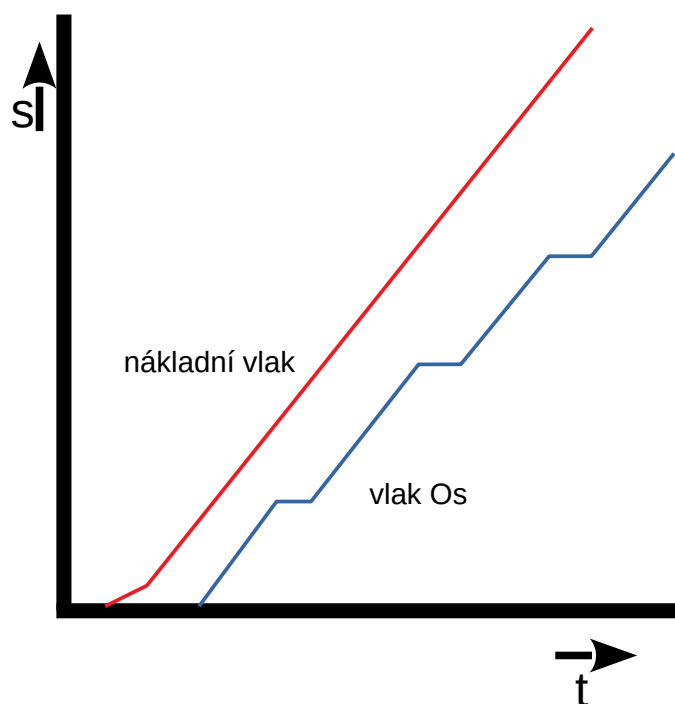
Obrázek 10: Jízda dvou vlaků po jedné koleji, současná pravidla.  
Zdroj: Autor



Obrázek 11: Skutečná jízda – současná pravidla, tři vlaky.  
Zdroj: Autor

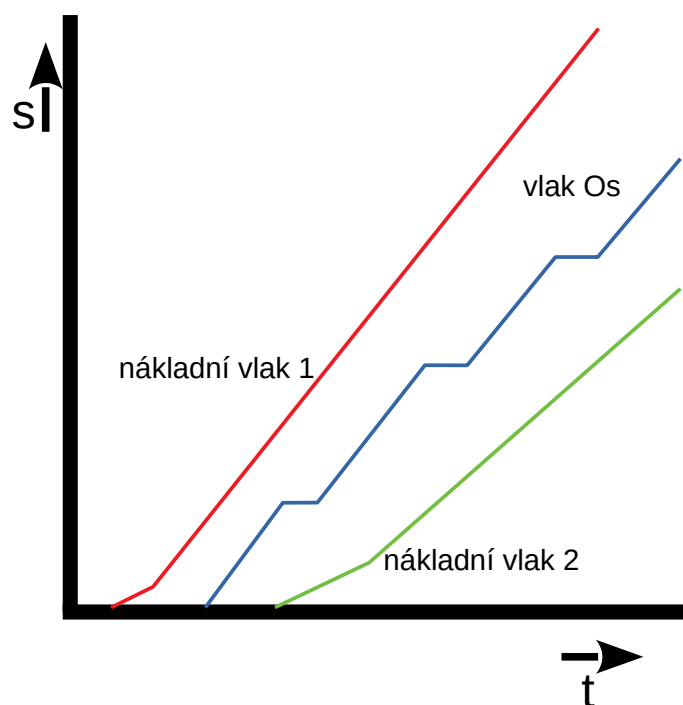
V případě pokusu o provedení tří vlaků, osobního a dvou nákladních, z nichž jeden docílí nižší rychlosti, než druhý, může nastat situace, znázorněná na obrázku 11. Nákladní vlak (znázorněný zeleně), už nemusí ani v rámci časového okna pro svazkování úsekem projet a bude zdržen v zadní dopravně přiléhající k úzkému hrdlu. Příčiny jsou nejen jeho nízká rychlost, ale i delší následné mezidobí mezi ním a prvním nákladním vlakem.

Jiná situace zřejmě nastane v okamžiku změny pořadí odjezdů vlaků ze zadní dopravní úseku, což je znázorněno na obrázku 12. Os z ní sice odjede díky delšímu následnému mezidobí později, než v situaci z obrázku 9, ale díky svým dynamickým schopnostem při změnách rychlosti jízdy, především při brzdění do míst zastavení a rozjezdech z nich, může toto zpoždění velmi často eliminovat. Díky pobytům v místech zastavení se mu nákladní vlak, jedoucí zhruba stejnou rychlostí celým úsekem, může dostatečně vzdálit. Nesporná výhoda tohoto řešení, obzvláště v okamžiku průjezdu nákladního vlaku přední dopravnou hrdla, je buď neblokovaní jejich staničních kolejí nebo eliminace zbytečné jízdy odbočkou se všemi jejími negativy. Popsaná situace je pouze hypotetická a účelem této práce je vyřčený předpoklad buď potvrdit nebo naopak vyvrátit.



Obrázek 12: Skutečná jízda – návrh nových pravidel, dva vlaky.  
Zdroj: Autor

Na obrázku 13 je situace znázorněna pro tři vlaky, ovšem na rozdíl od situace na obrázku 11 odjíždí druhý nákladní vlak na trať dříve, díky kratšímu následnému mezidobí. Vzhledem k tomu, že jede v těsném závěsu za Os, stihne úsek projet ještě před uzavřením časového okna.



Obrázek 13: Skutečná jízda – návrh nových pravidel, tři vlaky.  
Zdroj: Autor

## 6 Popis modelu

Model byl vytvořen na základě požadavků z kapitoly 5.9 a pracuje se sdíleným úložištěm dat, relační databází. Volba tohoto řešení umožní případný další rozvoj v podnikovém prostředí, Definiční data pro zpracování mohou být doplňována a měněna v úložišti dat nezávisle na místě spuštění simulace, případně umožňuje použít stejná data k simulacím běžícím nezávisle z více míst. Aplikace tedy pracuje typicky v modu klient – server. Zároveň je možno i využít vlastností databázového serveru, kdy data je možno předzpracovat přímo databází, což vede k menšímu zatížení LAN/WAN a klientských stanic.

### 6.1 Systémové požadavky

Hardware - server

Výkonnost HW a velikost jeho úložného prostoru v reálném nasazení se odvíjí od množství dat a počtu přístupů za jednotku času. Obecně se dá říci, že pro databázový stroj je důležitá hlavně rychlost úložiště dat, velká operační paměť a rychlá přístupové LAN.

Pro účely této práce byl simulátor vyvinut na následující HW konfiguraci:

- CPU AMD 6 core, 3.5 GHz
- RAM 12 GB
- HDD SSD, 256 GB

Při vývoji byla serverová i klientská část provozována na jednom HW.

Hardware – klient

Výkonnost HW klientské stanice není signifikantní, obecně lze říci, že stačí následující HW parametry:

- CPU 2 core
- RAM 4 GB
- HDD nejlépe SSD, minimálně 128 GB

## 6.2 Software

Celý simulátor byl vyvinut a provozován na Open Source programovém vybavení.

Software - server

- Operační systém – GNU/Linux, nejlépe Enterprise distribuce
- Databázový server - MySQL 8 nebo MariaDB 10

Software – klient

- Operační systém – GNU/Linux s grafickým prostředím, nejlépe Enterprise distribuce
- Databázový klient - MySQL 8 nebo MariaDB 10
- prostředí jazyka PHP
- gnuplot
- libovolný prohlížeč obrázků

## 6.3 Databázové tabulky

V simulační SW jsou tabulky použity pro tyto účely:

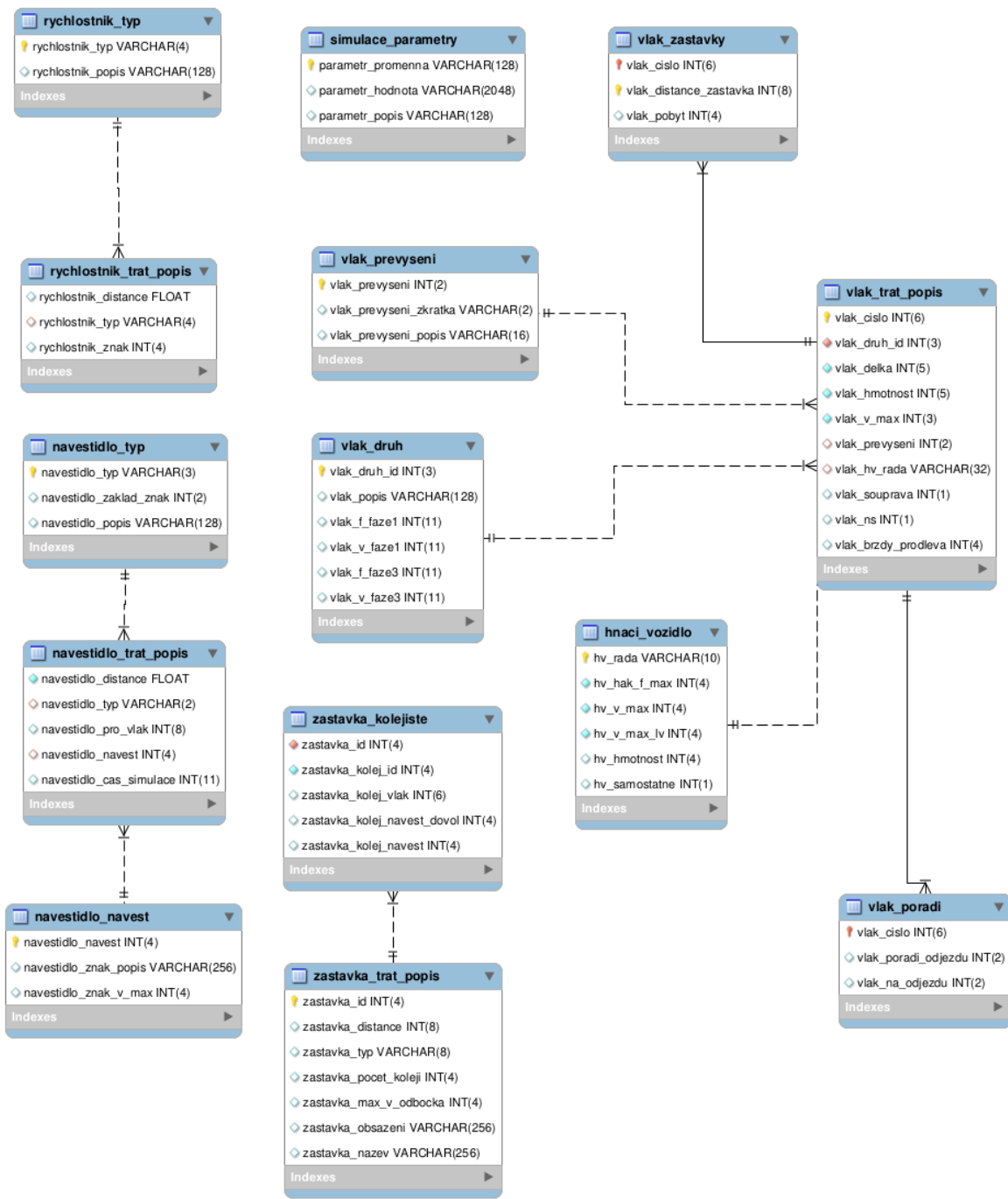
1. tabulky zadané uživatelem simulace, definující vozidla, vlaku a simulovaný úsek, maximální dobu běhu simulace a pod.,
2. tabulky, do kterých simulační program ukládá stavové informace modelu, data pro případnou další analýzu chování modelu,
3. tabulky pro uložení pomocných údajů.

Do obsahu tabulek z bodu 2. a 3. nesmí být zasahováno, neboť vnější zásah by mohl způsobit pád simulace, popřípadě by mohlo dojít ke zkreslení výsledků.

Na diagramu v obrázku 14 jsou zobrazeny definiční tabulky pro simulaci, údaje v nich jsou mandatorní. Na obrázku 15 jsou tabulky pracovní a pomocné. Struktura tabulek je v příloze B této práce.



Tabulky definující parametry simulace



Obrázek 14: Definiční tabulky modelu.

Zdroj: Autor

Tabulky generované simulací

statistika	vlak_jizda	trat_popis
vlak_cislo INT(6)	vlak_cislo INT(6)	trat_distance FLOAT
vlak_distance_aktualni FLOAT	vlak_distance_aktualni FLOAT	trat_item VARCHAR(8)
vlak_rychlost_aktualni FLOAT	vlak_rychlost_aktualni FLOAT	trat_item_typ VARCHAR(8)
vlak_cas_simulace INT(8)	vlak_cas_simulace INT(8)	Indexes
vlak_rychlost_rychlostnik INT(4)	vlak_rychlost_rychlostnik INT(4)	simulace_temp
vlak_rychlost_predzvestnik INT(4)	vlak_rychlost_predzvestnik INT(4)	promenna_nazev VARCHAR(32)
vlak_rychlost_navestidlo INT(4)	vlak_rychlost_navestidlo INT(4)	promenna_retez VARCHAR(256)
vlak_distance_rychlostnik FLOAT	vlak_distance_rychlostnik FLOAT	promenna_cislo FLOAT
vlak_distance_predzvestnik FLOAT	vlak_distance_predzvestnik FLOAT	trat_popis_tmp
vlak_distance_navestidlo FLOAT	vlak_distance_navestidlo FLOAT	trat_distance FLOAT
vlak_distance_zastavka FLOAT	vlak_distance_zastavka FLOAT	trat_item VARCHAR(8)
vlak_brzda_rychlostnik_cas INT(8)	vlak_brzda_rychlostnik_cas INT(8)	trat_item_typ VARCHAR(8)
vlak_brzda_navestidlo_cas INT(8)	vlak_brzda_navestidlo_cas INT(8)	
vlak_brzda_zastavka_cas INT(8)	vlak_brzda_zastavka_cas INT(8)	
vlak_brzda_rychlostnik INT(2)	vlak_brzda_rychlostnik INT(2)	
vlak_brzda_navestidlo INT(2)	vlak_brzda_navestidlo INT(2)	
vlak_brzda_zastavka INT(2)	vlak_brzda_zastavka INT(2)	
vlak_zrychleni_rychlostnik FLOAT	vlak_zrychleni_rychlostnik FLOAT	
vlak_zrychleni_navestidlo FLOAT	vlak_zrychleni_navestidlo FLOAT	
vlak_zrychleni_zastavka FLOAT	vlak_zrychleni_zastavka FLOAT	
vlak_zrychleni_tah_hv FLOAT	vlak_zrychleni_tah_hv FLOAT	
vlak_navest_navestidlo INT(4)	vlak_navest_navestidlo INT(4)	
vlak_zastavka_pobyt INT(8)	vlak_zastavka_pobyt INT(8)	
vlak_zabrzdna_navestidlo FLOAT	vlak_zabrzdna_navestidlo FLOAT	
vlak_simulace_konec INT(2)	vlak_simulace_konec INT(2)	
Indexes	Indexes	

Obrázek 15: Pracovní a pomocné tabulky

Zdroj: Autor

Stručný popis definičních tabulek, obrázek 14:

- rychlostnik\_typ povolené druhy rychlostníků a předzvěstníků,
- rychlostnik\_trat\_popis umístění a druhy rychlostníků v úseku,
- navestidlo\_typ povolená návěstidla,
- navestidlo\_navest povolené návěsti návěstidel,
- navestidlo\_trat\_popis umístění a druhy návěstidel v úseku,
- zastavka\_kolejiste popis kolejiště dopraven, umístění vlaků při odjezdu/příjezdu,
- zastavka\_trat\_popis umístění míst zastavení v úseku,
- simulace\_parametry konfigurace simulace,
- hnaci\_vozidlo hnací vozidla v modelu a jejich parametry,
- vlak\_druh druhy vlaků v simulaci dle předpisu [2],
- vlak\_zastavky definice míst, kde jednotlivé vlaky při simulaci mají pobyt,
- vlak\_prevyseni vlak jede s přebytkem/nedostatkem převýšení,
- vlak\_trat\_popis vlaky, které mohou být použity v simulaci, popis jejich parametrů,
- vlak\_poradi výběr vlaků z tabulky vlak\_trat\_popis a jejich pořadí, které se použijí v simulaci v daném běhu.

Stručný popis pracovních a pomocných tabulek, obrázek 15:

- trat\_popis                      tabulka s uloženými prvky trati z definičních tabulek, „co vidí strojvedoucí“,
- simulace\_temp                  tabulka pro uložení pomocných údajů,
- trat\_popis\_tmp                 tabulka, která je pomocná při generování tabulky trat\_popis,
- vlak\_jizda                      tabulka pro uložení stavových informací o vlacích v aktuálním čase simulace,
- statistika                        tabulka se vytvoří vždy v nové databázi, která je identifikována datem a časem spuštění simulace, obsahuje všechny kroky simulace z jejího běhu,

## 6.4 Hlavní části simulačního SW

Zdrojové kódy simulačního SW jsou v příloze A této práce.

Simulační program zatím nemá grafické uživatelské rozhraní a spouští se skriptem `spust_simulaci.sh` z příkazové řádky. Tento skript je řídicí, v prvním kroku spustí vlastní simulační program `simulace_main_nb.php`

## 6.5 Inicializace simulace

Po spuštění simulace proběhnou následující kroky:

- vytvoření databáze pro záznam simulace,
- zruší se obsazení kolejí přední i zadní dopravní,
- koleje přední dopravní se náhodně obsadí fantomovými vlaky, jejich počet je dán nastavením simulace,
- koleje zadní dopravní se obsadí vlaky, které budou simulovány, obsazení je náhodné,
- do pracovní tabulky se stavovými informacemi o jízdě vlaků se vloží simulované vlaky a hodnoty simulace se nastaví na počáteční hodnoty.

## 6.6 Běh simulace

### 6.6.1 Hlavní cyklus

Hlavní řídicí cyklus kontroluje další běh simulace, spouští procesy související se stavěním vlakových cest, návěstidel a jízdou vlaků, včetně zápisu dat do výstupních kanálů.

1. Proběhne kontrola, zda nebyla překročena maximální povolená doba simulace. Tato doba se nastavuje jako parametr simulace a lze ji měnit. Pokud byla doba překročena, celá simulace končí.
2. V případě času menšího, než je maximální povolený, proběhne kontrola, zda v simulaci jedou nějaké vlaky. V případě že nikoli, simulace končí, v opačném případě jsou spuštěny procesy související se stavěním vlakových cest a návěstidel, viz kapitola 6.6.2.

## 6.6.2 Stavění a zabezpečení vlakové cesty

Běh těchto modulů je spuštěn v každém iteračním kroku simulace ještě před tím, než proběhne simulace jízdy samotných vlaků v iteračním kroku, čili na jejich jízdu má vliv až konečný stav návěstidel po proběhnutí činnosti následujících modulů

- stavění autobloku
- odjezdový dispečer
- vjezdový dispečer

Stavění autobloku:

1. Postaví všechna návěstidla na základní návěst Volno.
2. Zjistí polohy začátků a konců vlaků a podle údajů postaví příslušná návěstidla na návěsti Stůj a Výstraha.
3. Pokud vlak nebo jeho část se nachází v prvním prostorovém oddílu přiléhajícím k zadní dopravě, zablokuje stavění odjezdového návěstidla z této dopravy.

Odjezdový dispečer:

1. V případě povolení odjezdu ze zadní dopravy na odjezdovém návěstidle (simulováno jako skupinové s číslem koleje) postaví návěst podle návěsti návěstěné na prvním návěstidle autobloku a odjezdové rychlosti z koleje, na níž čeká vlak na odjezd.
2. V případě, že z předchozí iterace byl povolen odjezd a návěstidlo není na Stůj, zjistí polohu odjíždějícího vlaku. Pokud čelo vlaku minulo odjezdové návěstidlo, přestaví návěstidlo na návěst Stůj a vlak je vymazán ze seznamu vlaků čekajících na odjezd.
3. Pokud v seznamu čekajících vlaků není žádný vlak, na návěstidle zůstává trvale návěst stůj.

Vjezdový dispečer:

1. Pokud se v úseku mezi vjezdovým návěstidlem a koncem zabezpečeného výhybkového obvodu nalézá vlak, zůstává vjezdové návěstidlo na návěst Stůj a poslední návěstidlo autobloku je nastaveno na návěst Výstraha. Jinak krok 2.
2. Je postavena vlaková cesta na dispečerem zvolenou kolej a na vjezdovém návěstidle je návěstěna příslušná návěst, stejně tak jako na posledním návěstidle autobloku.

### 6.6.3 Jízda vlaku

Simulace vlaků probíhá v každém iteračním kroku tak, jak jedou za sebou, pro každý vlak separátně. Pojmy brzdění a rozjezd jsou použity jen pro snadnější pochopení funkce jednotlivých bloků programu. Ve skutečnosti každý blok vrací hodnotu kladného nebo záporného zrychlení, která se použije ve výpočtu pohybu vlaku.

1. Pro každý ještě simulovaný vlak jsou zjištěny jeho definiční parametry (hmotnost, hnací vozidlo atd) a stavové parametry (aktuální pozice, rychlost atd).
2. Je porovnána aktuální pozice vlaku s nastaveným koncem simulovaného úseku. Pokud je pozice vyšší, je vlak ze simulace vyřazen. Jinak krok 3.
3. Zjistí, jaké atributy ovlivňující jízdu vlaku jsou v dohledové vzdálenosti, tedy rychlostníky, předzvěstníky a návěstidla. Hodnoty z nich zaznamenej. Výjimku jsou místa plánovaného zastavení, simulovaný vlak je má nastaveny už od odjezdu z předchozího místa zastavení, což lze přirovnat ke čtení SJŘ.
4. Pokud je na návěstidle Stůj a aktuální rychlost vlaku = 0, brzda zůstává aktivována, zrychlení vlaku = 0, pokračování krokem 17. Jinak odbrzdí a pokračuj krokem 5.
5. Zjistí minimum z těchto rychlostí, tzn. rychlost povolenou:
  1. maximální rychlost povolená návěstidlem,
  2. maximální rychlost vlaku,
  3. maximální rychlost hnacího vozidla,
  4. maximální rychlost povolená rychlostníkem, předzvěstníkem,
  5. rychlost povolená z předchozích kroků simulace.

6. Porovnej rychlost povolenou s aktuální rychlostí:
  1. aktuální rychlost je menší, pokračuj krokem 7,
  2. aktuální rychlost je rovna, pokračuj krokem 8,
  3. aktuální rychlost je vyšší, pokračuj krokem 9,
7. Pokud je brzda neaktivní, vypočti tah hnacího vozidla. Procenta pro rychlost a tah jsou v popisu vlaku, průběh rozjezdu je ve třech fázích:
  1. rychlost aktuální je menší než procento pro fázi 1 z povolené rychlosti, pak tah HV je procentech maximálního tahu HV pro fázi 1,
  2. rychlost aktuální je větší než procento pro fázi 3 z povolené rychlosti, pak tah HV je procentech maximálního tahu HV pro fázi 3,
  3. rychlost aktuální je mezi těmito hranicemi, pak tah HV = maximální tah HV,
  4. rychlost aktuální je menší než povolená rychlost o méně než 3 km/h, pak nastav malý tah náhodně z intervalu 5 – 10 kN.
8. Pokud rychlost aktuální = rychlost povolená, pak zaveď jízdu výběhem a tah HV je malý, záporný a náhodný, simuluje jízdní odpory.
9. Z tahu HV, hmotnosti vlaku a HV vypočti zrychlení, pokračuj krokem 17.
10. Pokud je rychlost vyšší, než povolená a není-li pro příčinu snížení rychlosti již brzděno, přejdi do:
  1. snížení rychlosti před návěstidlem krok 13,
  2. snížení rychlosti před rychlostníkem krok 12.
11. Pokud se vlak podle aktuální rychlosti blíží na zábrzdnu vzdálenost k zastávce, pokračuj krokem 14.
12. Před předzvěstníkem zaveď jízdu výběhem. Při míjení vypočti podle rozdílu rychlosti aktuální a rychlosti návěstěné zábrzdnu vzdálenost s jistou rezervou závislou na aktuální rychlosti. Zaznamenej čas, spočti potřebné záporné zrychlení a začni brzdit. První čtyři vteřiny velmi mírně, pak vypočteným záporným zrychlením. Pokud rozdíl rychlosti aktuální a rychlosti povolené je menší než 5 km/h, sniž záporné zrychlení na minimum. Při poklesu aktuální rychlosti pod povolenou rychlost odbrzdi.



13. V případě návěstidla se zavedenou rychlostní návěstěnou soustavou, chovej se jako v kroku 11. Jinak:

1. Před návěstí výstraha, pokud je rychlost povolená rychlostníkem vyšší, chovej se jako u předzvěstníku 40 km/h, sniž rychlost aktuální na tuto hodnotu stejným postupem, jako v bodě 11. a udržuj ji. Jinak udržuj rychlost z rychlostníku, dokud neuvidíš další návěstidlo. Podle návěsti buď pokračuj v jízdě nebo:
2. Pokud je návěstěno Stůj, vypočti zábrzdnu a začni brzdit, stejný postup, jako v bodě 11. Pokud je rychlost aktuální menší, než 1 km/h, pak nastav rychlost aktuální rovnou nule a zrychlení také rovno nule. Po zastavení vlaku zůstává brzda aktivována!

14. Sniž rychlost do zastávky stejným postupem jako v kroku 11. Pokud je rychlost aktuální menší, než 1 km/h, pak nastav rychlost aktuální = 0 a také zrychlení = 0. Po zastavení vlaku zůstává brzda aktivována. Zznamenej si dobu pobytu z tabulky a každém kroku iterace sniž hodnotu pobytu o jedna. Pokud pobyt = 0, povol brzdu, vlak se při další iteraci podle kroku 5 rozjede. Pokud je pobyt v tabulce pobytů = -1, vlak zde jízdu končí a je vyřazen ze simulace.

15. Pokud čelo vlaku mine návěstidlo nebo rychlostník povolující vyšší rychlost, než dosud povolenou:

1. konec vlaku neminul rychlostník nebo návěstidlo, rychlost povolená se nemění,
2. konec vlaku minul rychlostník nebo návěstidlo, rychlost povolená = rychlost návěstěná, vlak začne zrychlovat.

16. Pokud čelo vlaku mine návěstidlo nebo rychlostník, zapomeň jeho polohu, ale návěst / rychlost si pamatuj.

17. Z hodnoty zrychlení z předchozích modulů, aktuální pozice a rychlosti vypočti nové hodnoty rychlosti a polohy. Hodnotami přepiš stávající hodnoty v tabulce jízdy vlaku pro použití v další iteraci. Přidej tyto hodnoty do statistické databáze a do výstupních souborů pro zpracování programem pro tvorbu grafů.

Nyní proběhne iterační krok simulace dalšího vlaku v pořadí, pokud vlak ještě existuje.

## 6.7 Ukončení simulace

Simulace je ukončena v okamžiku kdy nastane jedna ze dvou následujících podmínek:

1. Všechny vlaky v simulaci buď dojedou do přední dopravní a ukončí zde jízdu nebo opustí simulovaný úsek, to znamená, že v simulaci nezůstane žádný vlak.
2. Vyprší maximální nastavený čas simulace.

Simulační program uzavře připojení do databáze a vrátí řízení skriptu, který jako následný krok spustí generování grafů na základě dat vzniklých během simulace. K vytvoření obrázků s grafy slouží program gnuplot. Obrázky jsou ve formátu jpeg, ale není problém je po změně konfigurace vygenerovat i v jiném formátu. Pro zobrazení je tedy možno použít jakýkoli prohlížeč obrázků nebo je včlenit přímo do dokumentu.

## 6.8 Možnosti dalšího rozvoje simulátoru

Simulátor ve své stávající podobě je v řadě aspektů velmi jednoduchý a má svá omezení.

Další možnosti rozvoje a doprogramování funkcionalit:

- Přenos návštěv na stanoviště.
- Jemnější řešení rozjezdových křivek.
- Technická prodleva brzd.
- Interaktivní uživatelské rozhraní včetně průběžného grafického zobrazování výsledků simulace.
- Možnost zařadit do simulace více dopraven s čekajícími vlaky, umožnit průjezd jedoucího vlaku simulovaným úsekem.
- Měnit směry svazkovaní.
- Vliv jízdnicích odporů vlaku na základě sklonových a směrových poměrů simulovaného úseku.

## 6.9 Hnací vozidla použitá v modelu

Hnací vozidla uvedená v tabulce 2, jsou typickými zástupci hnacích vozidel pro vozbu vlaků na našich tratích, podobných zkoumanému úseku. Pokud je označení řady hnacího vozidla čtyřmístné, znamená to, že vozidlo vede vlak jako vícečlenné, přičemž první tři číslice jsou

označení řady vozidla a čtvrtá číslice znamená počet HV ve vícečlenném uspořádání. Technické údaje o vozidlech byly přebrány z Atlasu lokomotiv [12].

*Tabulka 2: Řady hnacích vozidel používaných v simulaci*

*Zdroj: Autor,[12]*

Řada hnacího vozidla	Maximální tažná síla [kN]	Maximální rychlost [km/h]	Hmotnost vozidla [t]
111	186	80	70
130	228	100	85
150	227	120	82
151	210	160	82
162	258	140	85
163	285	120	84
181	345	90	124
471	180	140	155
753	215	100	77
7532	340	100	154

## 6.10 Vlaky použité v modelu

V modelu byly použity vlaky, uvedené v tabulce 3. Vlakovům osobní dopravy jako předloha posloužily skutečné vlaky ČD, podle nich a Atlasu vozů [13] pak byly vypočteny délky a hmotnosti. Vlaky nákladní dopravy byly odhadnuty podle nabídek vozů ČD Cargo [14], na základě zkušeností autora. Vlaky neodpovídají přesně skutečnosti a jsou jen pro potřeby modelu. Pokud je vlak uveden jako ucelená jednotka, jako hmotnost se počítá pouze náklad a hmotnost vlaku je uvedena u řady hnacího vozidla, respektive jednotky v tabulce 2, kterou je vlak tvořen.

*Tabulka 3: Vlaky, použité v modelu.*

*Zdroj: Autor, [13][14]*

Číslo vlaku	Druh vlaku podle [2]	Délka vlaku [m]	Hmotnost vlaku [t]	Max. rychlost vlaku [km/h]	Hnací vozidlo – řada	Ucelená jednotka
527	Ex	160	270	140	151	ne
123	R	180	315	160	162	ne
9001	Os	80	25	140	471	ano
12003	Os	105	180	120	163	ne
67005	Pn	590	2400	95	7532	ne
67007	Pn	600	900	100	163	ne
67009	Pn	600	900	100	130	ne
77005	Pn	320	600	80	163	ne
87005	Mn	200	200	60	111	ne
87007	Mn	350	320	70	130	ne

## 6.11 Místa zastavení vlaků v modelu

V tabulce je seznam míst pro zastavení vlaků, především osobní dopravy. Počet staničních kolejí ve stanicích a vzdálenosti od počátku simulovaného úseku jsou pouze pro potřeby simulace a nemusí přesně odpovídat skutečnosti.

Tabulka 4: Místa zastavení vlaků v simulaci

Zdroj: Autor

Jméno	Typ	Distance [m]	Počet kolejí
Přelouč	stanice	0	8
Valy u Přelouče	zastávka	3000	1
Opočíněk	zastávka	6500	1
Svítkov	zastávka	8100	1
Pardubice	stanice	13300	18

## 6.12 Umístění návěstidel

V tabulce je uveden druh návěstidel v simulovaném úseku a jejich vzdálenosti od jeho počátku. Poloha a počet návěstidel je pouze pro potřeby simulace a nemusí přesně odpovídat skutečnosti.

Tabulka 5: Umístění návěstidel

v simulaci

Zdroj: Autor

Typ návěstidla	Distance [m]
Odjezdové návěstidlo	15
Navěstidlo autobloku	1200
Navěstidlo autobloku	2400
Navěstidlo autobloku	3600
Navěstidlo autobloku	4800
Navěstidlo autobloku	6000
Navěstidlo autobloku	7300
Navěstidlo autobloku	8600
Navěstidlo autobloku	9800
Vjezdové návěstidlo	11000

## 6.13 Scénáře simulace

Pro simulaci byly použity různé scénáře, odlišené:

1. Rychlostní konfigurací tratě, tabulka 6:
  - a) Úsek bez omezení rychlosti, vlaky byly omezeny pouze technickými omezeními, vlaky mohou při jízdě využít veškerou dynamiku, omezení pouze jízdou ostatních vlaků.
  - b) Úsek s velkým a dlouhým omezením rychlosti, v realitě může představovat stav po nehodě, případně po živelné pohromě, vlaky jsou omezovány maximální rychlostí v úseku pomalé jízdy, nemohou využívat svých dynamických možností.
  - c) Úsek s velkým a menším omezením rychlosti, v realitě může představovat stav při rekonstrukci tratě. Vlaky mohou využít dynamiku pouze částečně. V části tratě jsou omezeny pomalou jízdou.

Tabulka 6: Konfigurace simulačních tratí. Zdroj: Autor

Distance [m]	Pro vlak	Rychlost-nik [km/h]
Trať I.		
500	np	160
500	pp	140
Trať II.		
500	pp	140
500	np	160
3500	pp	30
3500	np	30
7500	pp	140
7500	np	160
Trať III.		
500	pp	140
500	np	160
3500	pp	30
3500	np	30
5800	pp	90
5800	np	90
8500	pp	140
8500	np	160

pp – vlaky jedoucí s přebytkem převýšení

np – vlaky jedoucí s nedostatkem převýšení

2. Ve všech konfiguracích tratí bylo použito 8 skupin pořadí vlaků, přehledně jsou uvedeny v tabulce 7. Pro všechny tři traťové konfigurace byly vždy použity všechny skupiny vlaků. Mezi sebou se skupiny odlišovaly:
- Os je ve skupině 1 a 2 veden elektrickou motorovou jednotkou, ve skupině 3 a 4 klasickou soupravou s lokomotivou.
  - Pn je ve skupině 1 a 3 vlak o hmotnosti 2400 t, ve skupině 2 a 4 vlak o hmotnosti 900 t.
  - První a poslední vlak ve skupině je vždy stejný.

Tabulka 7: Skupiny pořadí jízd vlaků a druhy vlaků

Zdroj: Autor

Pořadí	Skupina 1, pořadí současné		Skupina 1, pořadí navrhované		Skupina 2, pořadí současné		Skupina 2, pořadí navrhované	
	Druh vlaku	Číslo vlaku	Druh vlaku	Číslo vlaku	Druh vlaku	Číslo vlaku	Druh vlaku	Číslo vlaku
1	Ex	527	Ex	527	Ex	527	Ex	527
2	Os	9001	Pn	67005	Os	9001	Pn	67007
3	Pn	67005	Os	9001	Pn	67007	Os	9001
4	Mn	87007	Mn	87007	Mn	87007	Mn	87007
Pořadí	Skupina 3, pořadí současné		Skupina 3, pořadí navrhované		Skupina 4, pořadí současné		Skupina 4, pořadí navrhované	
	Druh vlaku	Číslo vlaku	Druh vlaku	Číslo vlaku	Druh vlaku	Číslo vlaku	Druh vlaku	Číslo vlaku
1	Ex	527	Ex	527	Ex	527	Ex	527
2	Os	12003	Pn	67005	Os	12003	Pn	67007
3	Pn	67005	Os	12003	Pn	67007	Os	12003
4	Mn	87007	Mn	87007	Mn	87007	Mn	87007

## 6.14 Výsledky simulací

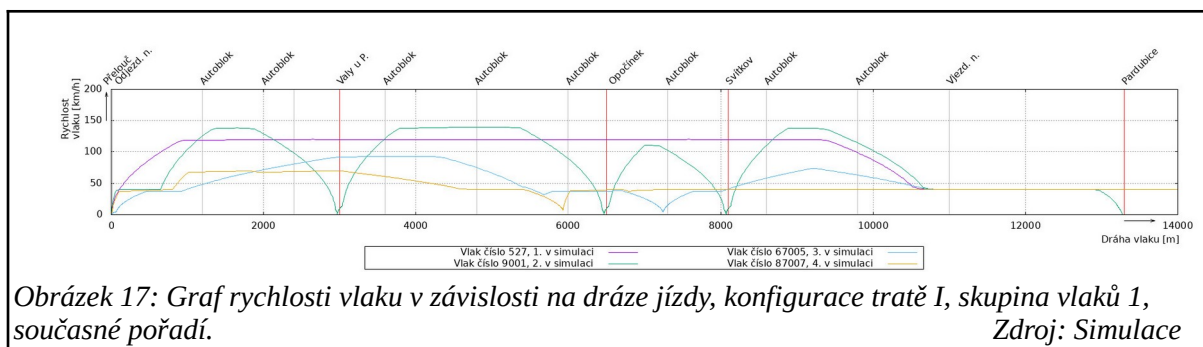
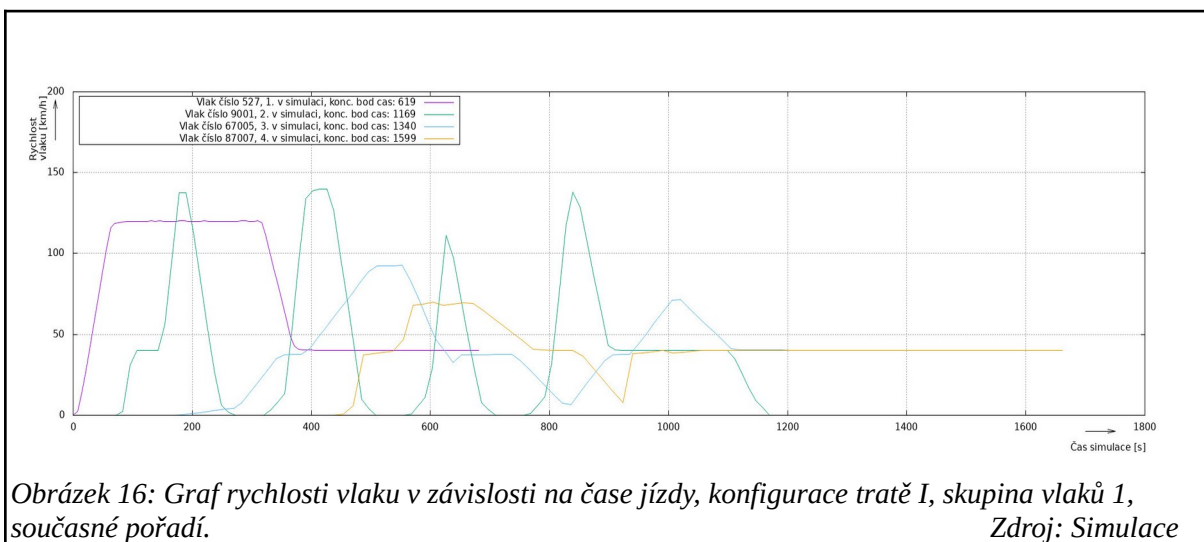
Na následujících stránkách jsou tabulkově vyčísleny výsledky simulačních scénářů, které byly popsány v kapitole 6.13., v každé tabulce jsou vždy výsledky pro současnou i navrhovanou časovou polohu vlaku pro snadnější porovnání. Zároveň jsou zde k nahlédnutí grafy vykreslující názorně jízdu vlaků.

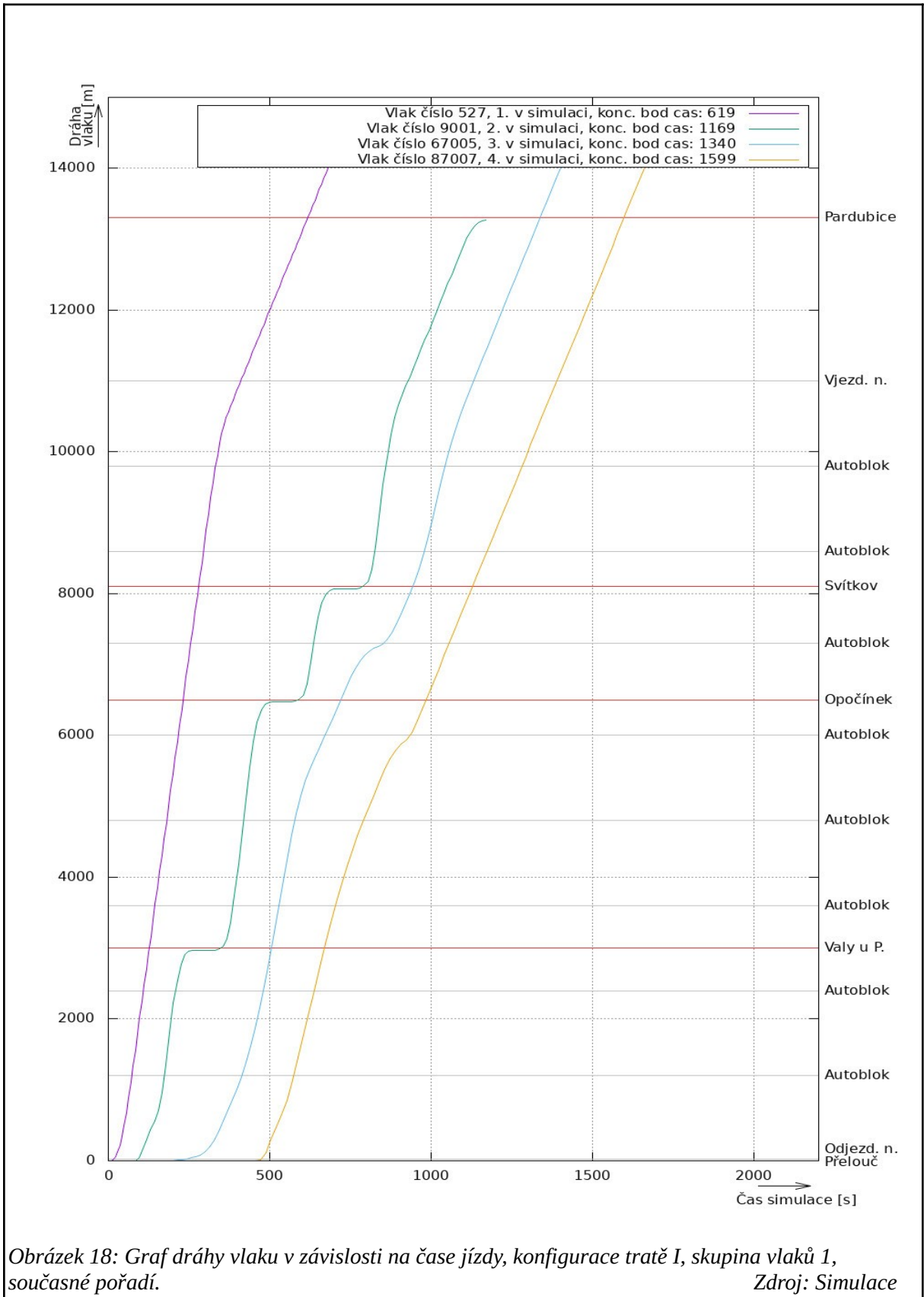
Konfigurace tratě I, skupina vlaků 1, současné pořadí, výsledky v tabulce 8.

Tabulka 8: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať I, sada 1, současnost		Trať I.,sada 1, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	619	527	619
9001	1169	67005	951
67005	1340	9001	1446
87007	1599	87007	1602





Obrázek 18: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 1, současné pořadí. Zdroj: Simulace

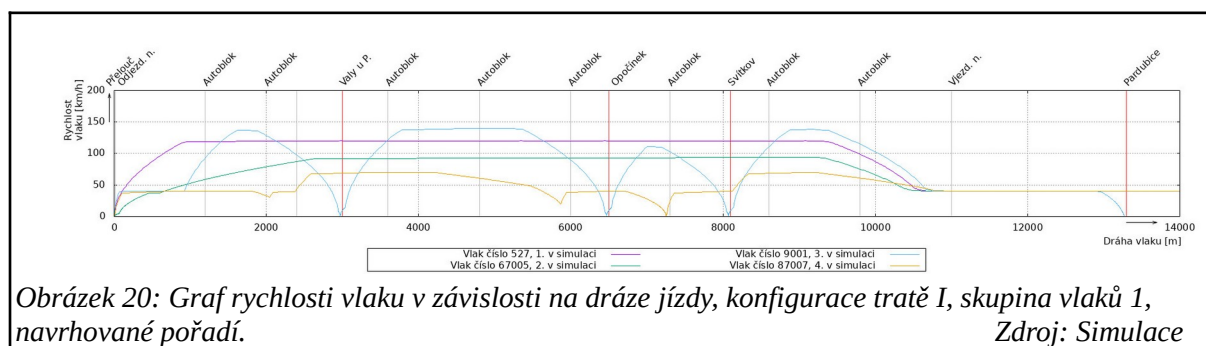
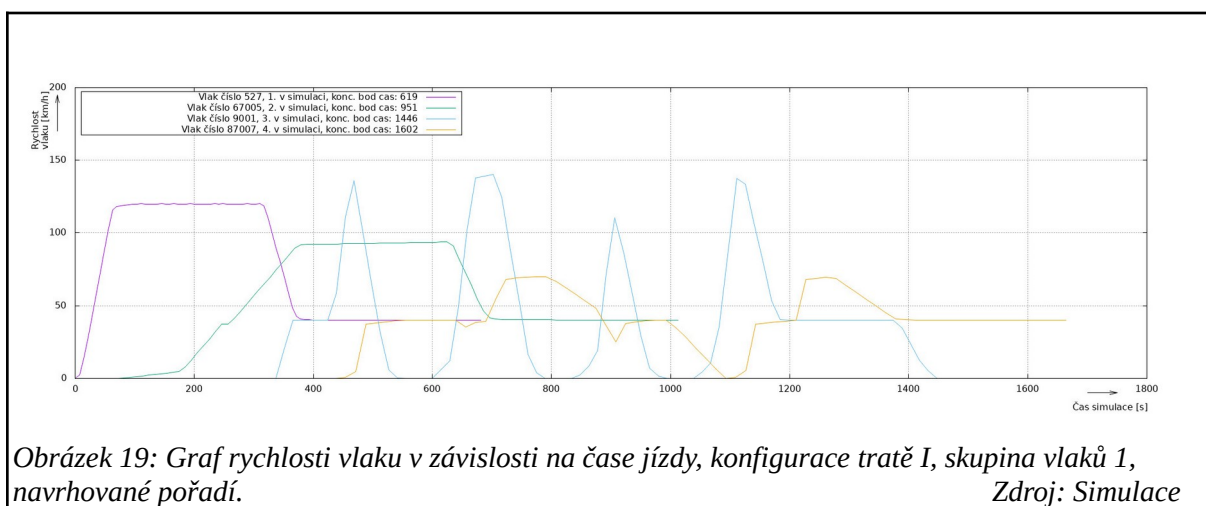


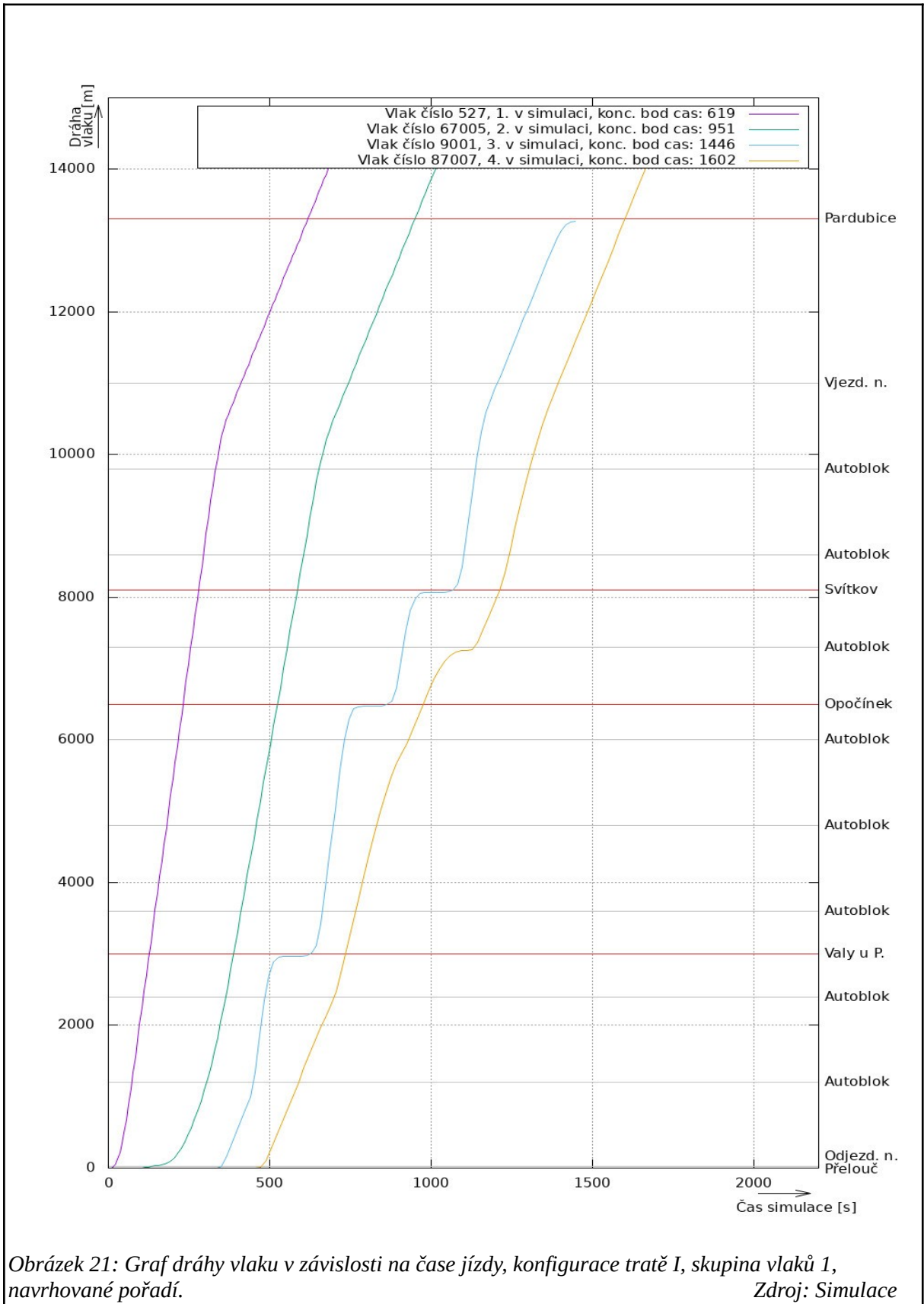
Konfigurace tratě I, skupina vlaků 1, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 9.

Tabulka 9: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať I, sada 1, současnost		Trať I.,sada 1, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	619	527	619
9001	1169	67005	951
67005	1340	9001	1446
87007	1599	87007	1602



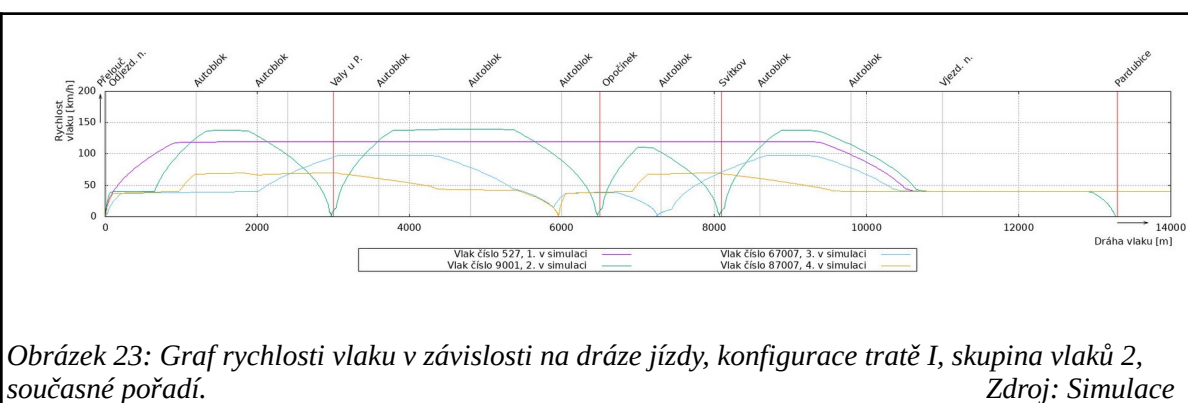
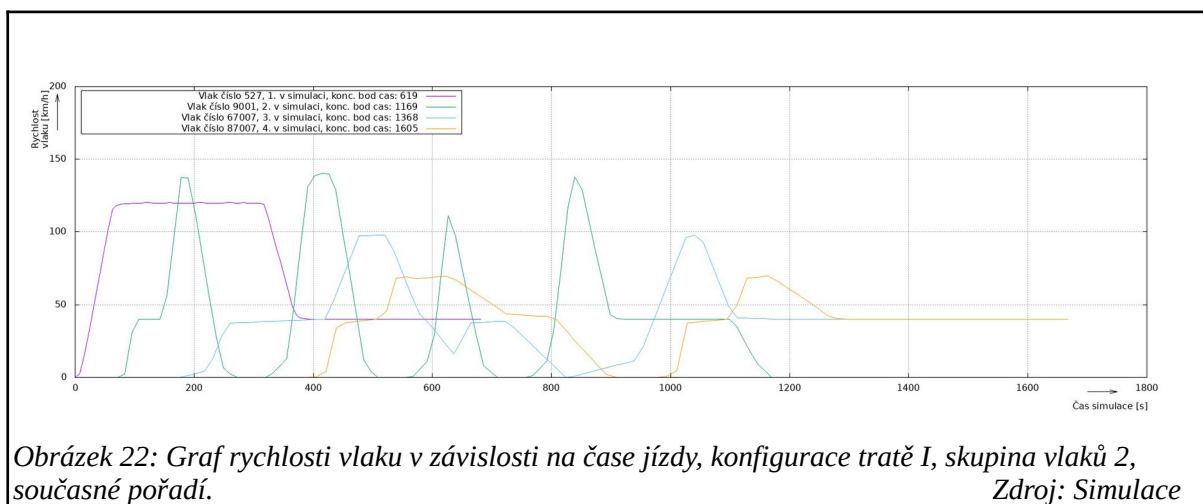


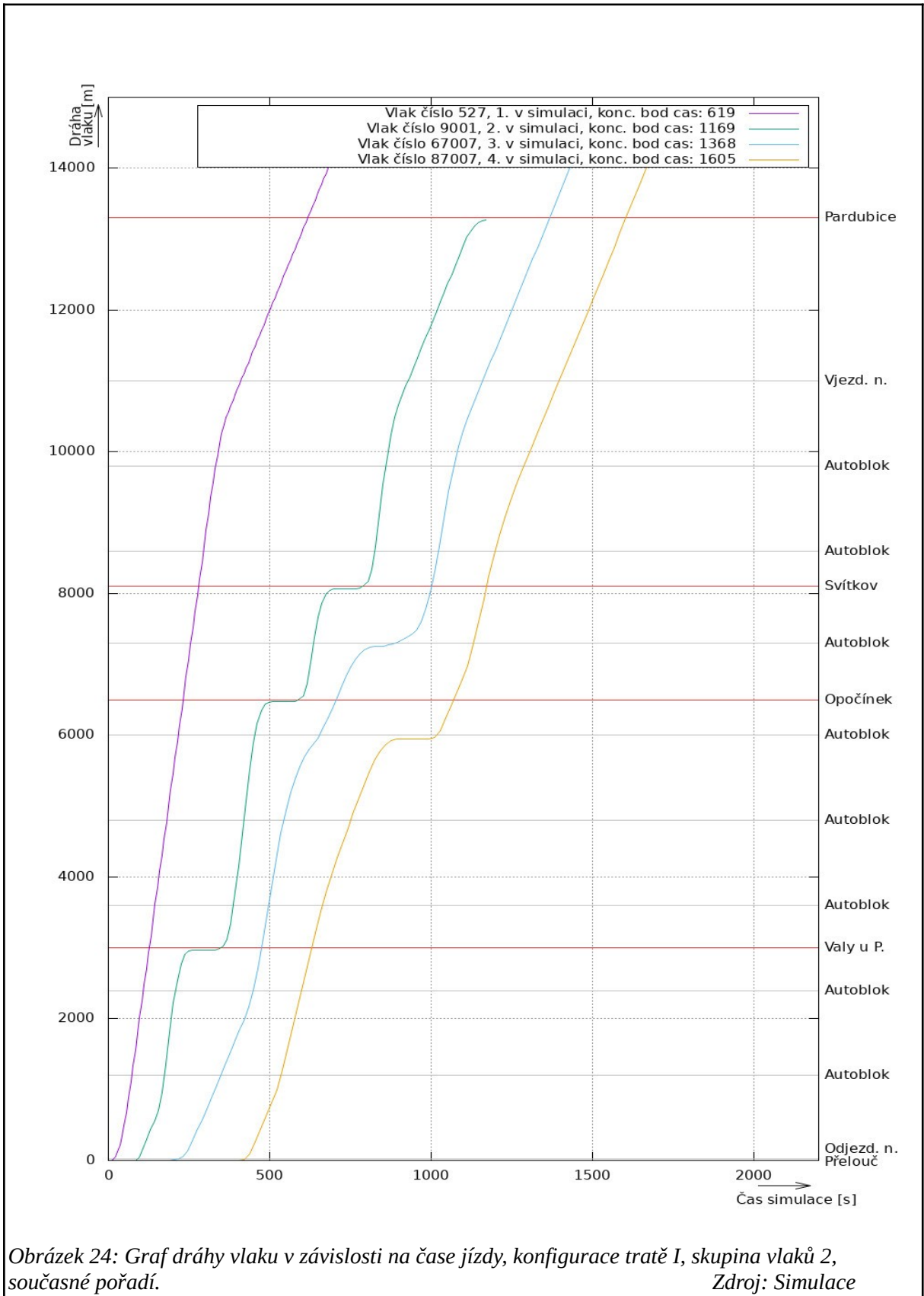
Konfigurace tratě I, skupina vlaků 2, pořadí současné, výsledky v tabulce 10.

Tabulka 10: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať I, sada 2, současnost		Trať I.,sada 2, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	619	527	552
9001	1169	67007	850
67007	1368	9001	1364
87007	1605	87007	1519





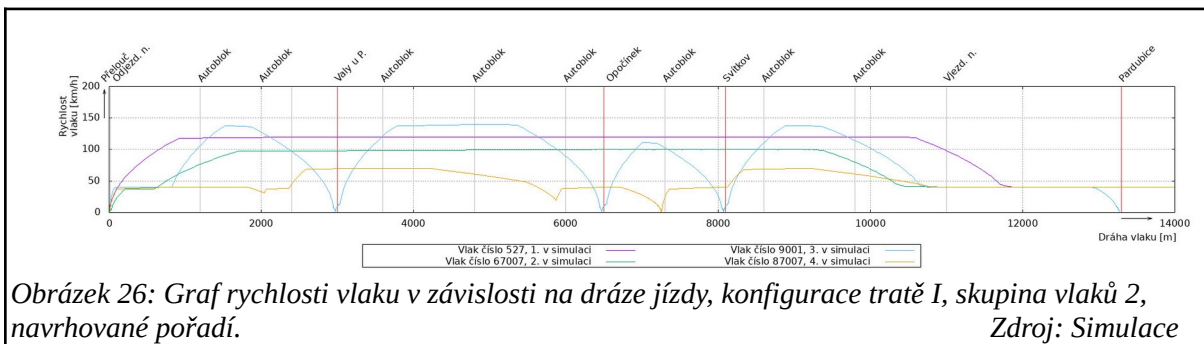
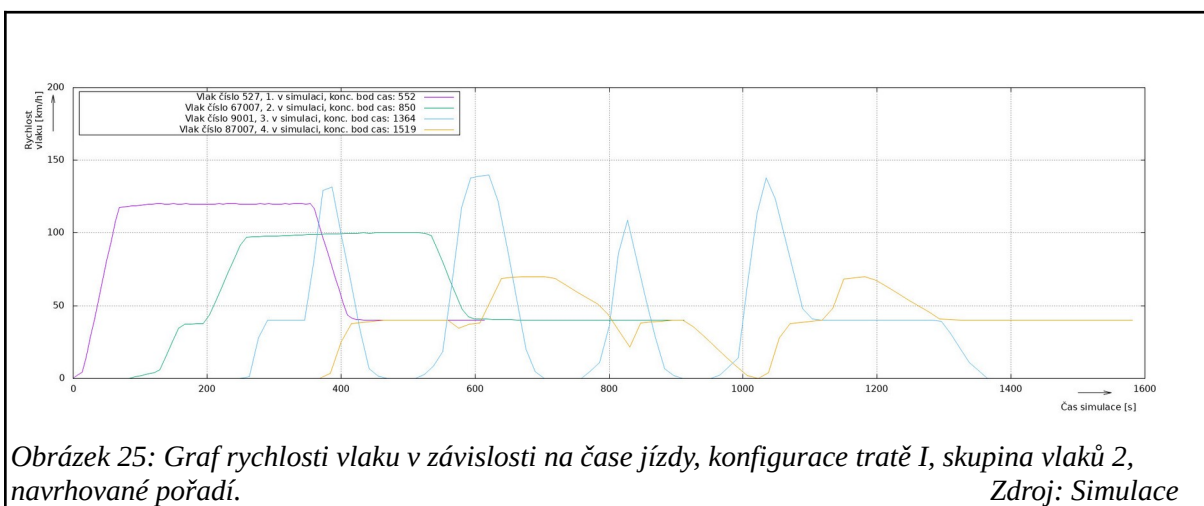
Obrázek 24: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 2, současné pořadí. Zdroj: Simulace

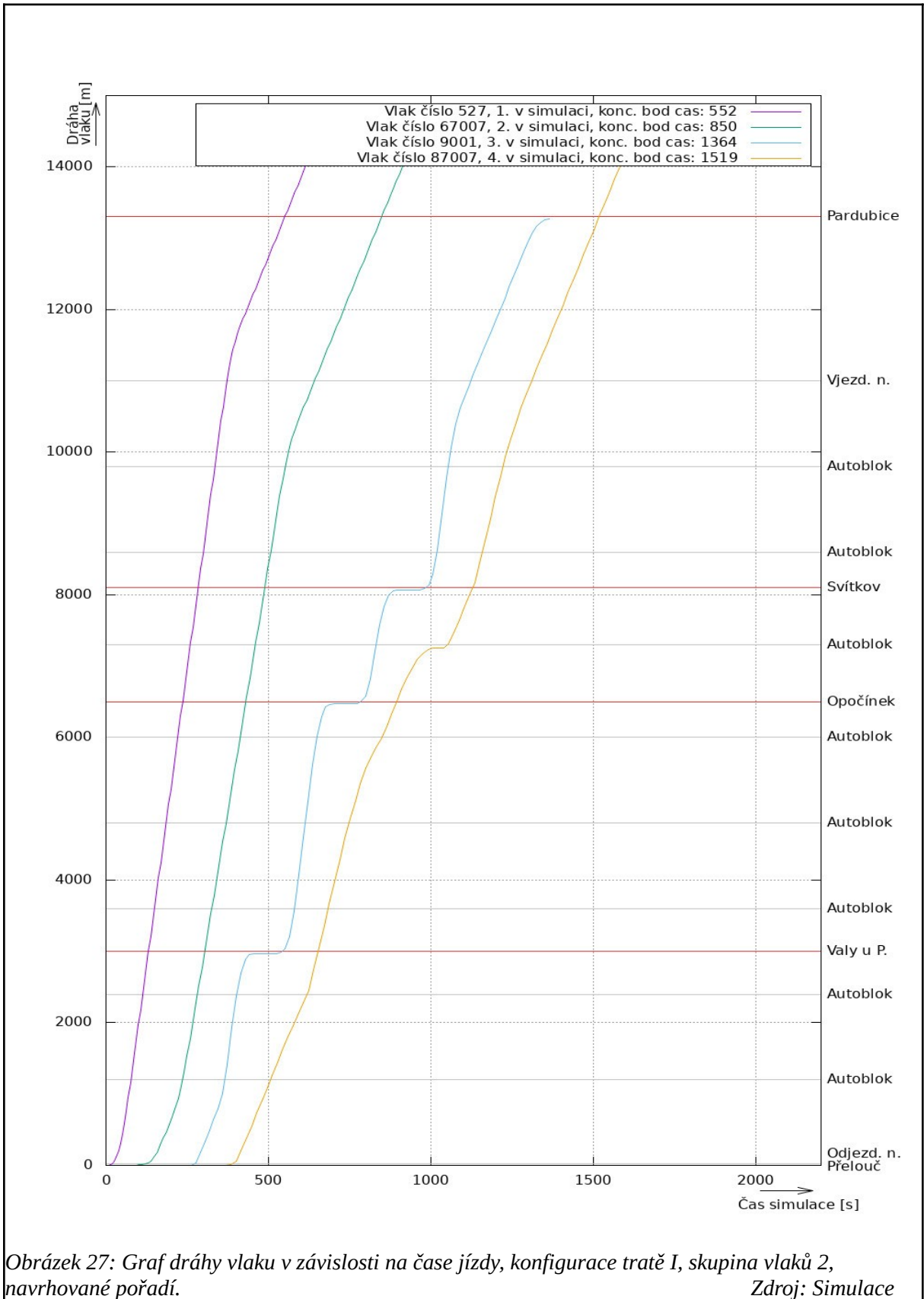
Konfigurace tratě I, skupina vlaků 2, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 11.

Tabulka 11: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať I, sada 2, současnost		Trať I.,sada 2, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	619	527	552
9001	1169	67007	850
67007	1368	9001	1364
87007	1605	87007	1519





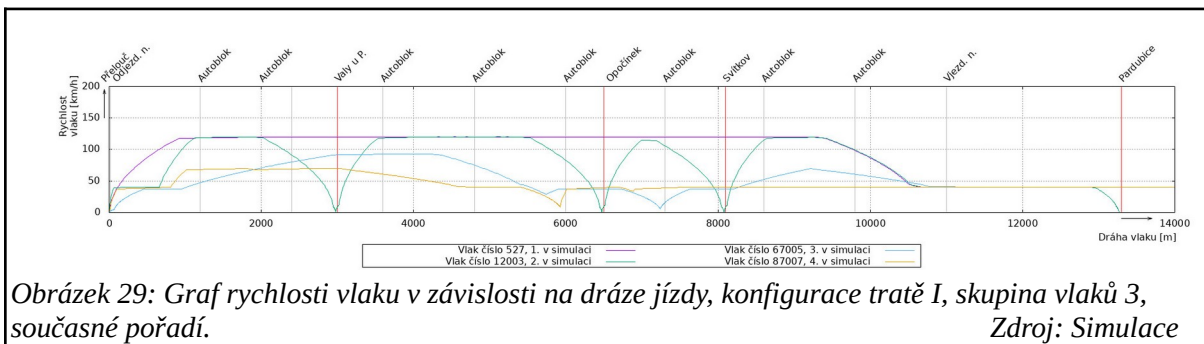
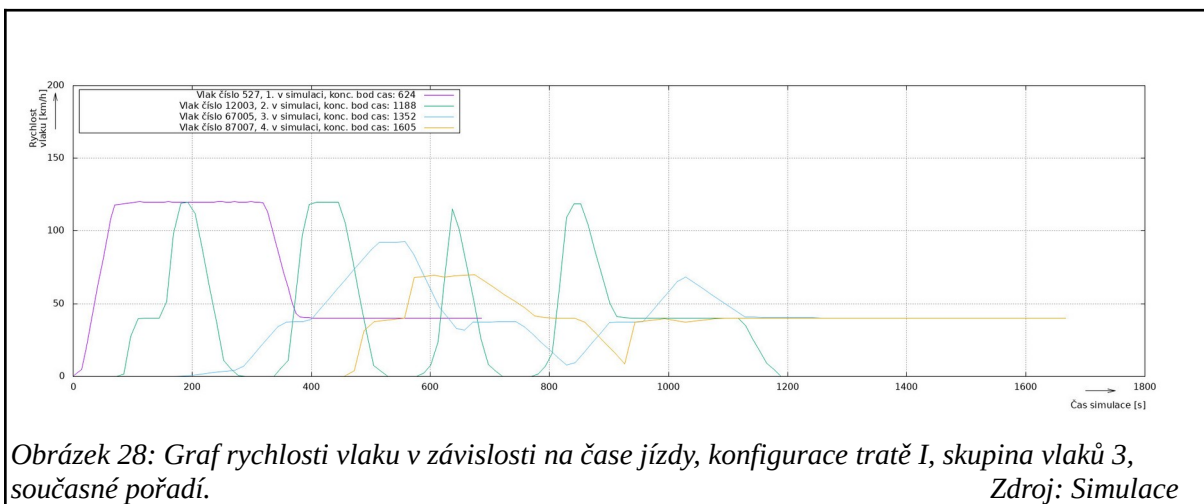
Obrázek 27: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 2, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace

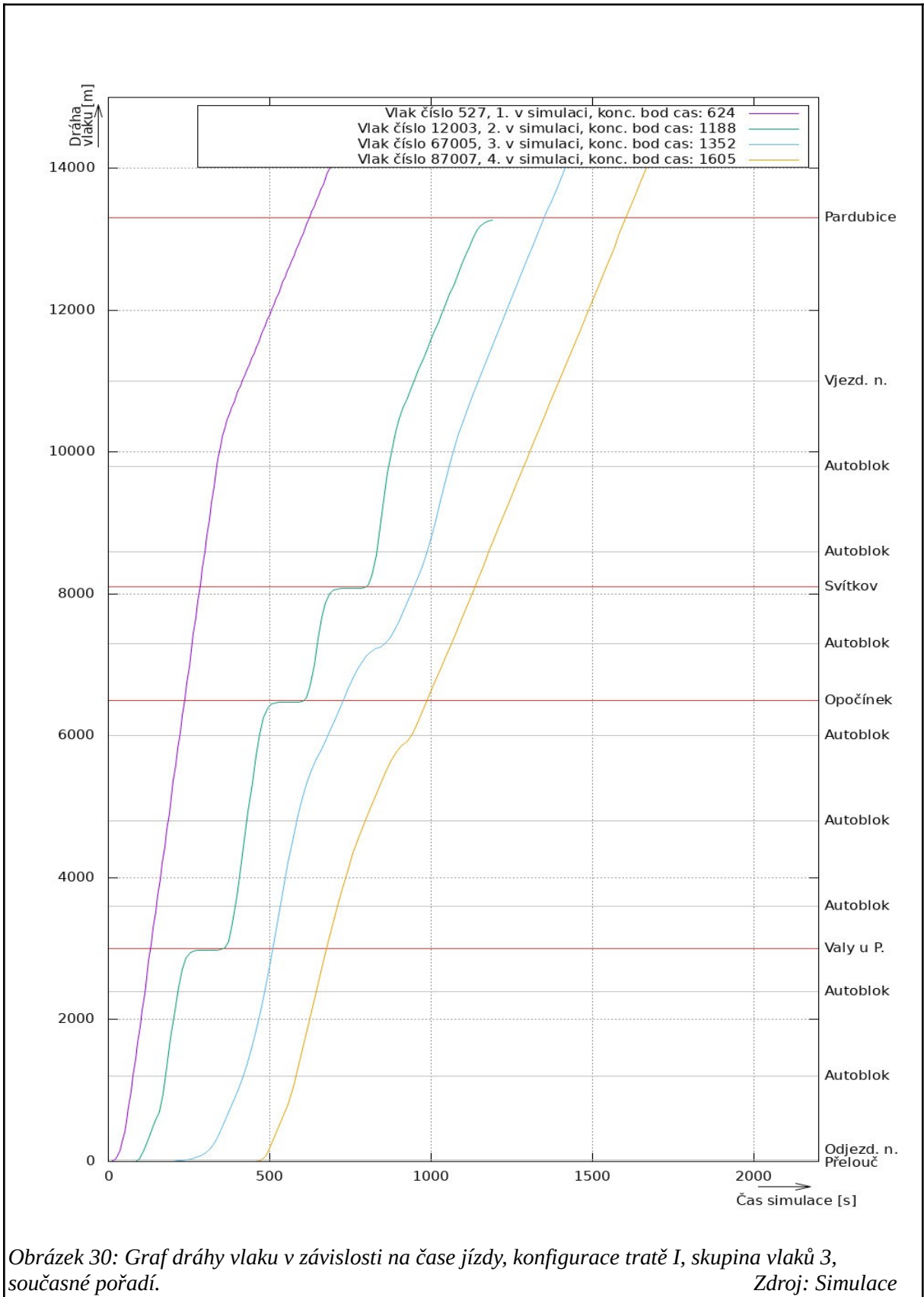
Konfigurace tratě I, skupina vlaků 3, pořadí současné výsledky v tabulce 12.

Tabulka 12: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať I, sada 3, současnost		Trať I., sada 3, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	624	527	619
12003	1188	67005	949
67005	1352	12003	1458
87007	1605	87007	1604





Obrázek 30: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 3, současné pořadí. Zdroj: Simulace

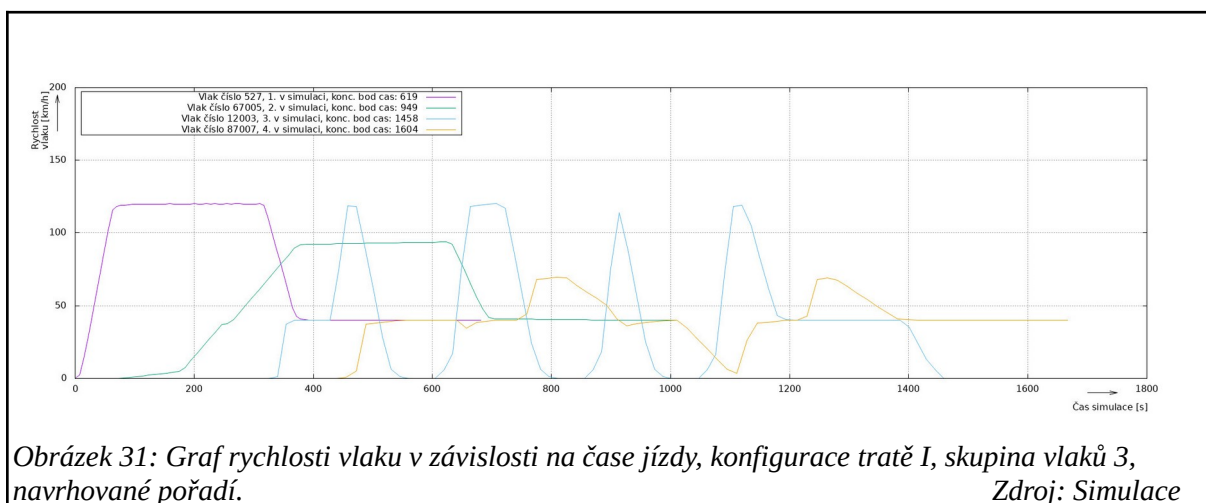


Konfigurace tratě I, skupina vlaků 3, pořadí navrhované výsledky v tabulce 13.

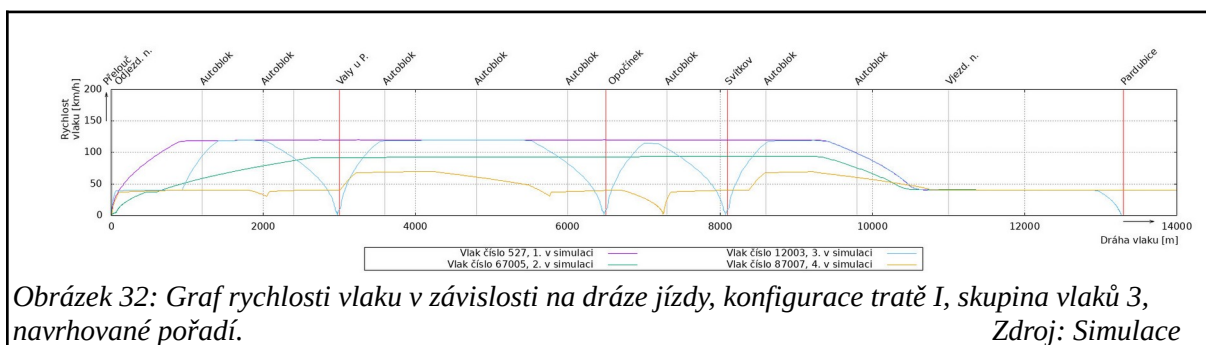
Tabulka 13: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

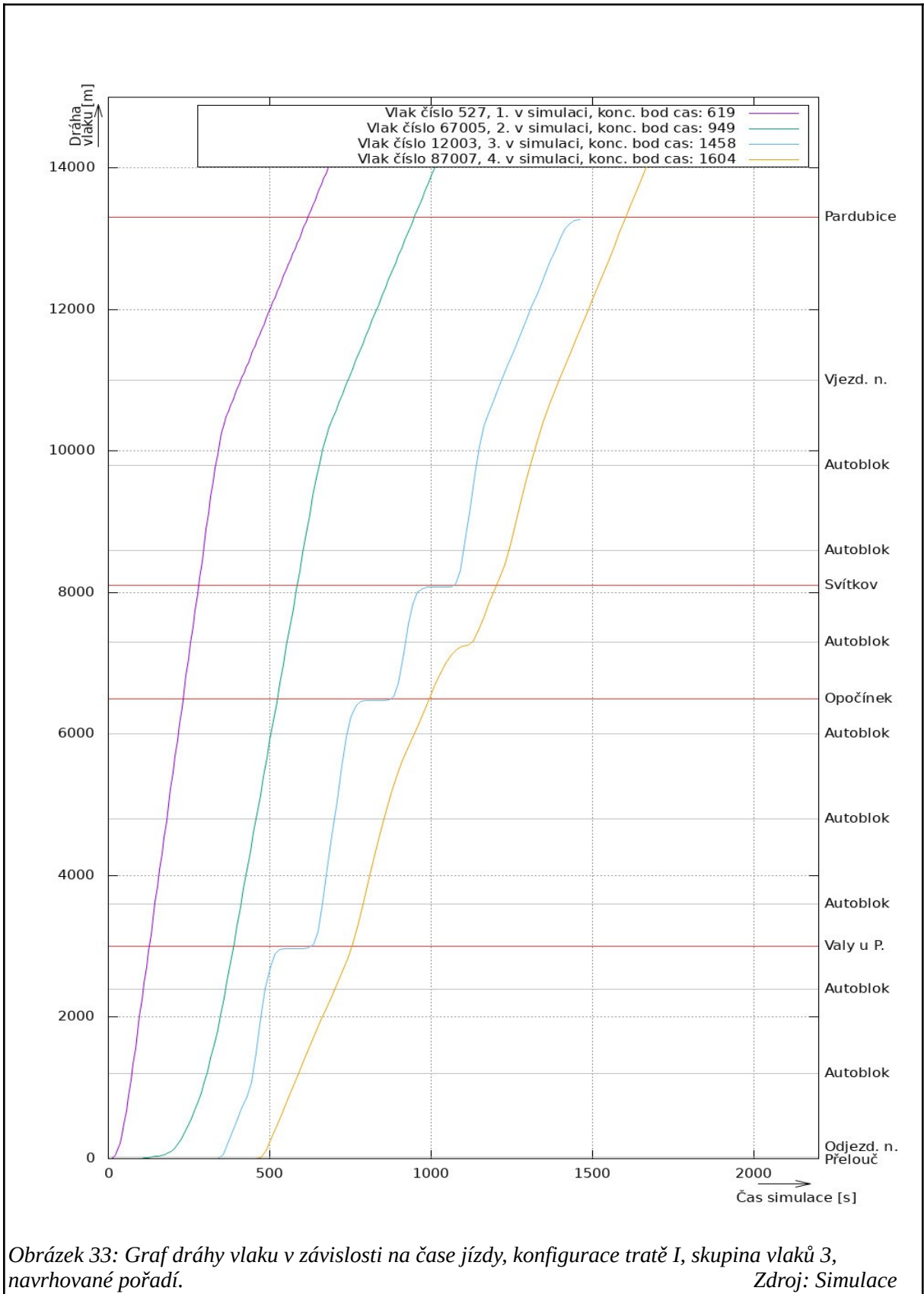
Trať I, sada 3, současnost		Trať I., sada 3, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	624	527	619
12003	1188	67005	949
67005	1352	12003	1458
87007	1605	87007	1604



Obrázek 31: Graf rychlosti vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 3, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace



Obrázek 32: Graf rychlosti vlaku v závislosti na dráze jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 3, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace



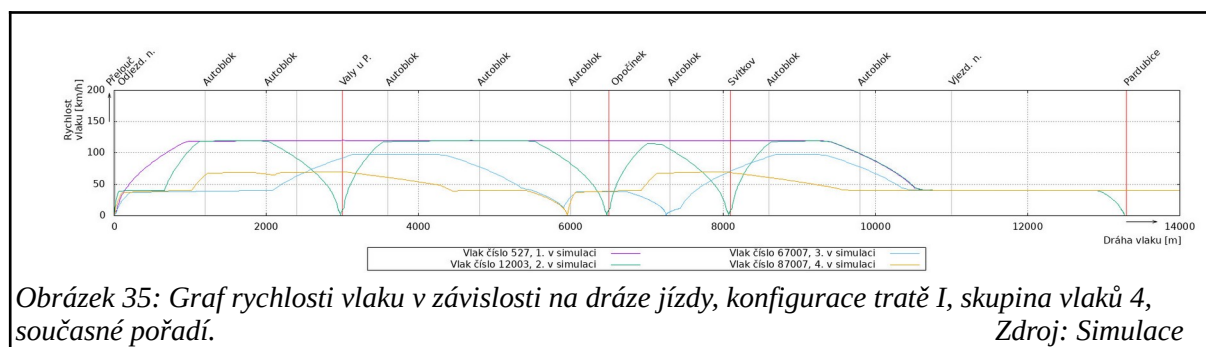
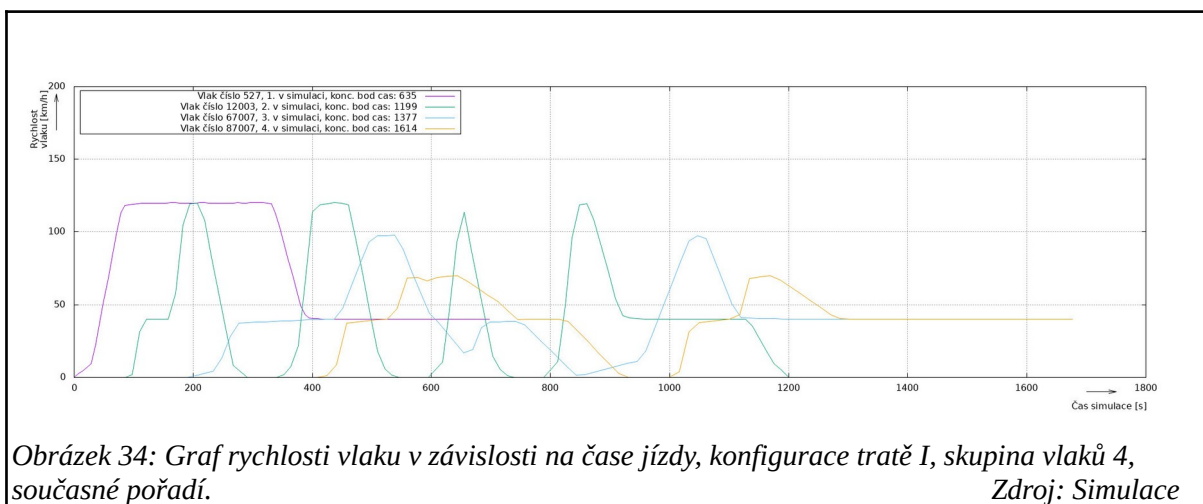
Obrázek 33: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 3, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace

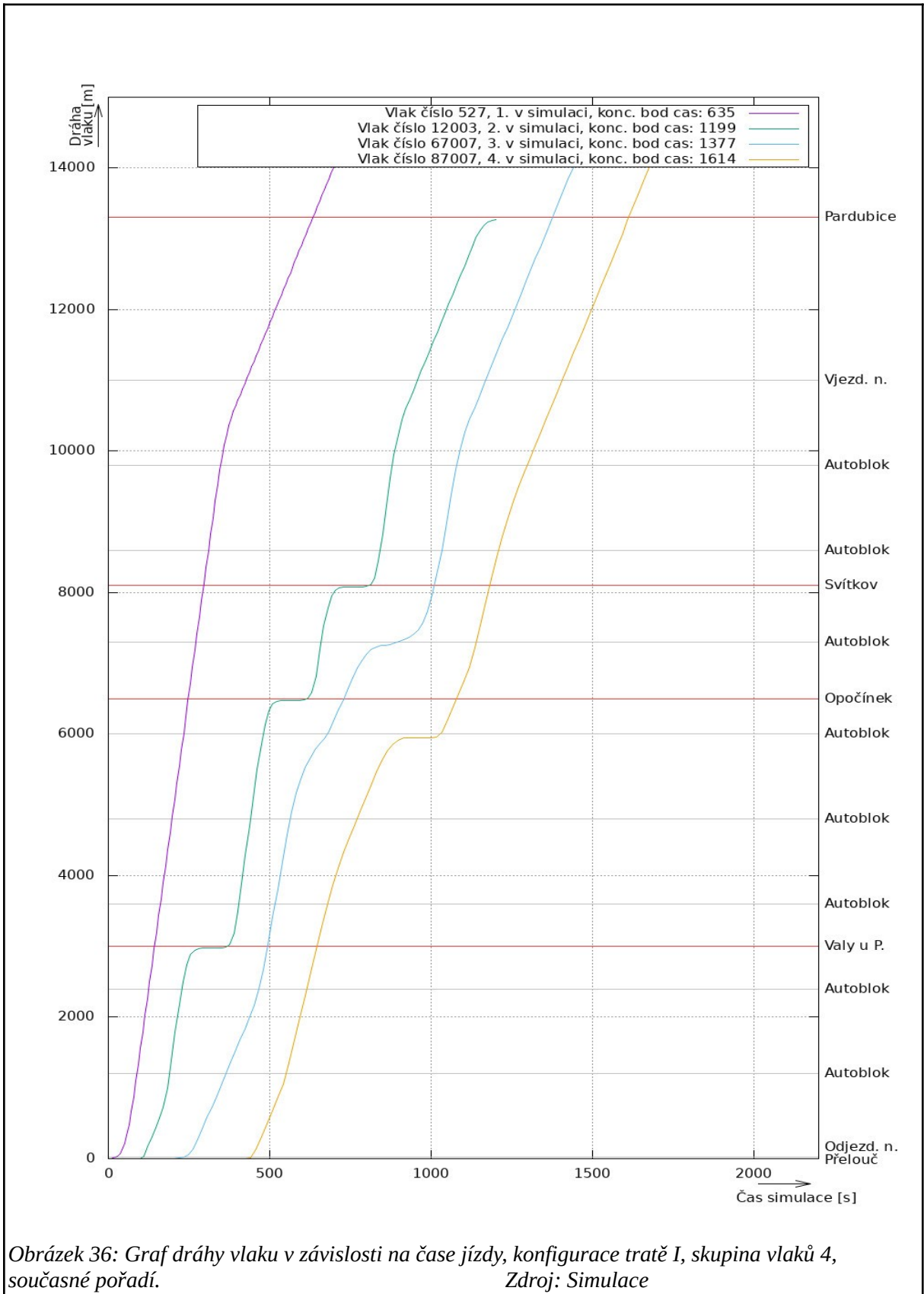
Konfigurace tratě I, skupina vlaků 4, pořadí současné, výsledky v tabulce 14.

Tabulka 14: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať I, sada 4, současnost		Trať I., sada 4, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	635	527	619
12003	1199	67007	785
67007	1377	12003	1299
87007	1614	87007	1501





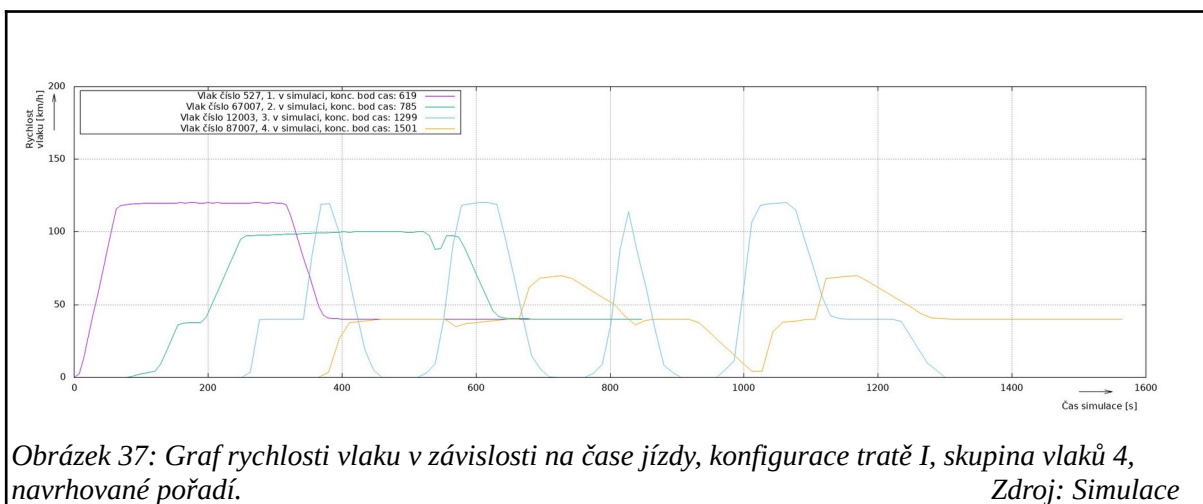
Obrázek 36: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 4, současné pořadí.  
 Zdroj: Simulace

Konfigurace tratě I, skupina vlaků 4, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 15.

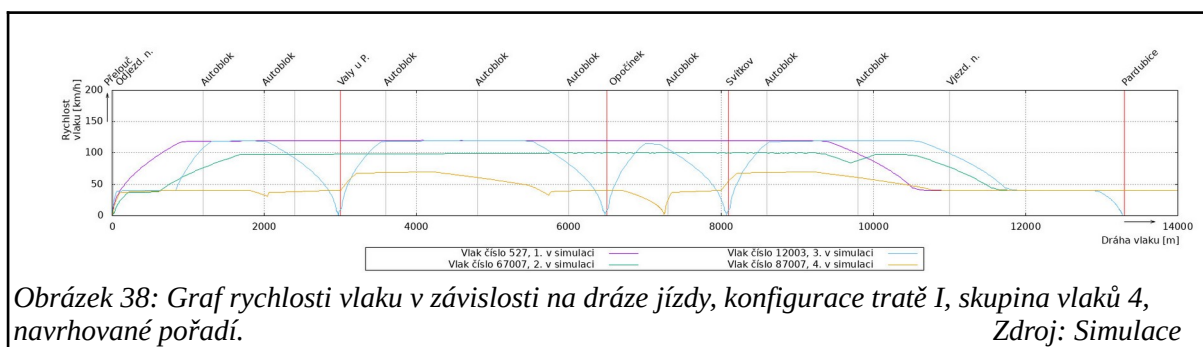
Tabulka 15: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

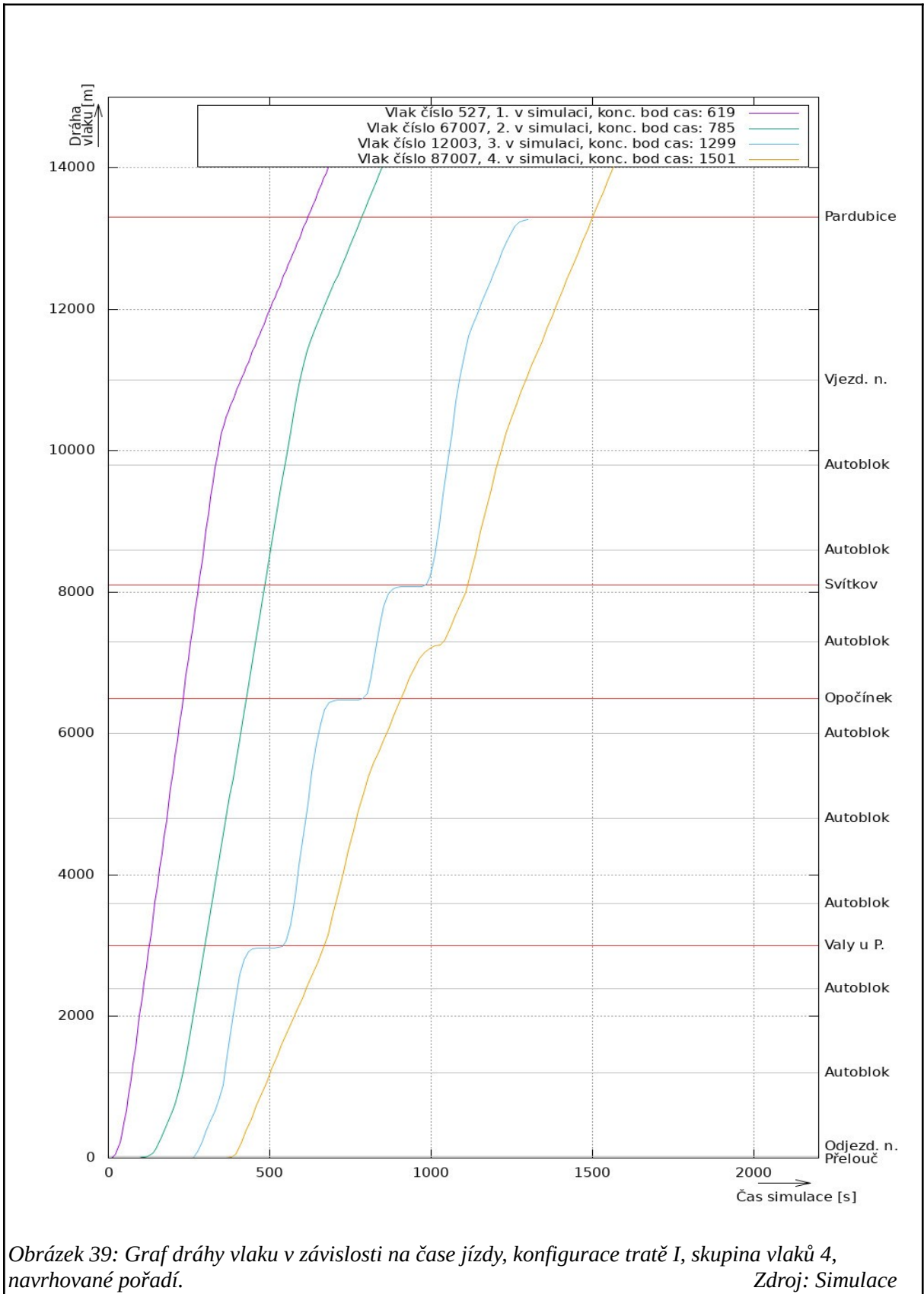
Trať I, sada 4, současnost		Trať I., sada 4, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	635	527	619
12003	1199	67007	785
67007	1377	12003	1299
87007	1614	87007	1501



Obrázek 37: Graf rychlosti vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 4, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace



Obrázek 38: Graf rychlosti vlaku v závislosti na dráze jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 4, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace



Obrázek 39: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě I, skupina vlaků 4, navrhované pořadí.

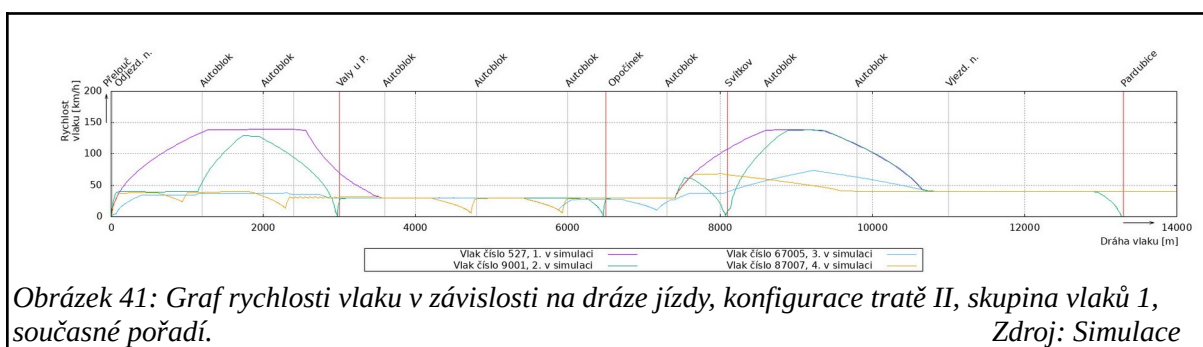
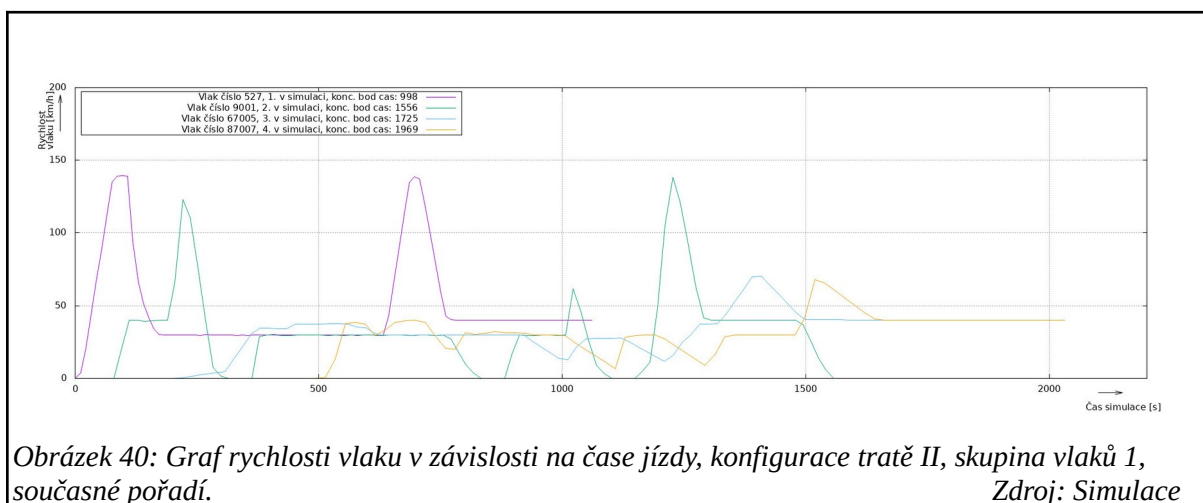
Zdroj: Simulace

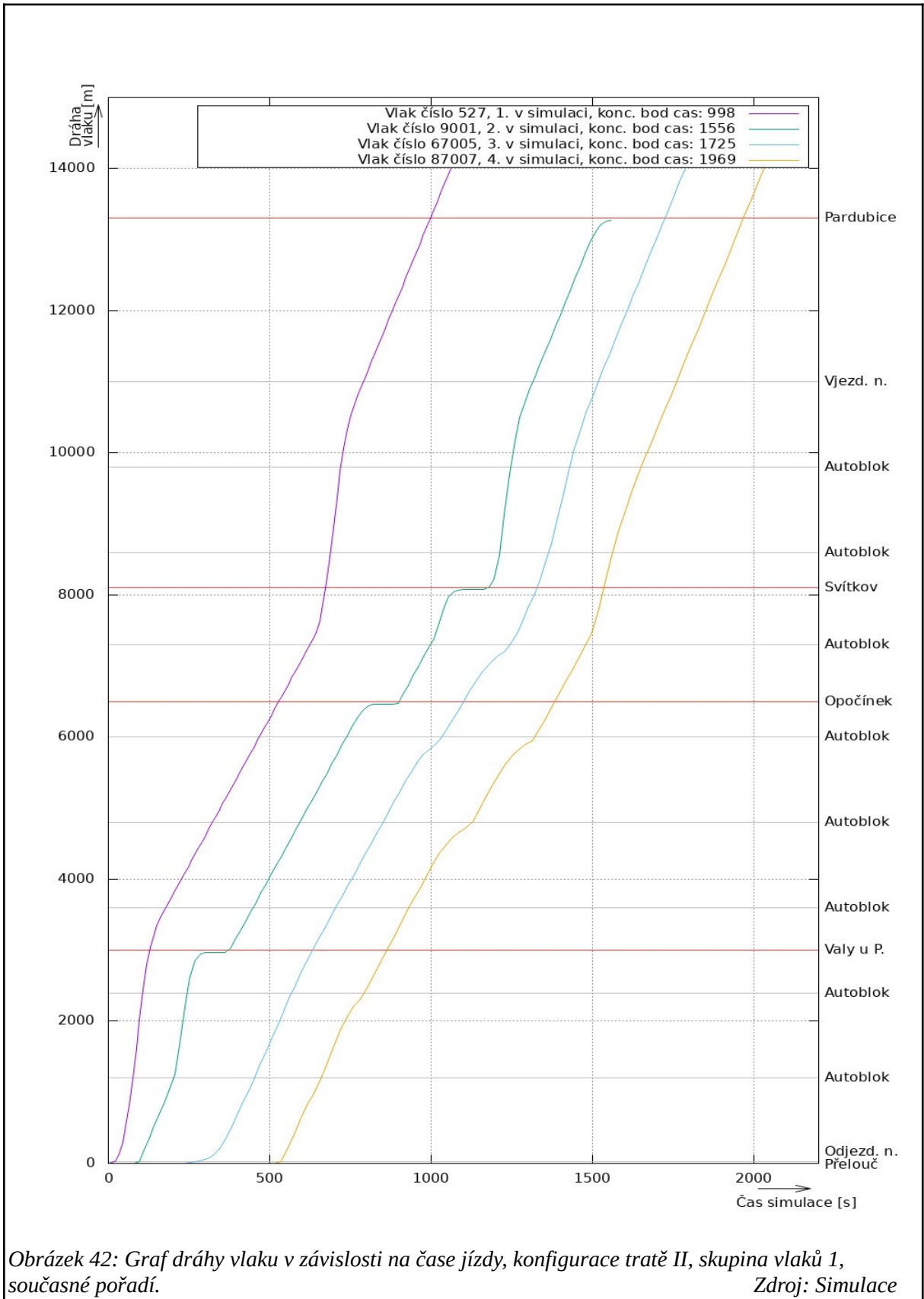
Konfigurace tratě II, skupina vlaků 1, pořadí současné, výsledky v tabulce 16.

Tabulka 16: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať II, sada 1, současnost		Trať II, sada 1, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	998	527	1012
9001	1556	67005	1404
67005	1725	9001	1960
87007	1969	87007	2110





Obrázek 42: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě II, skupina vlaků 1, současné pořadí. Zdroj: Simulace

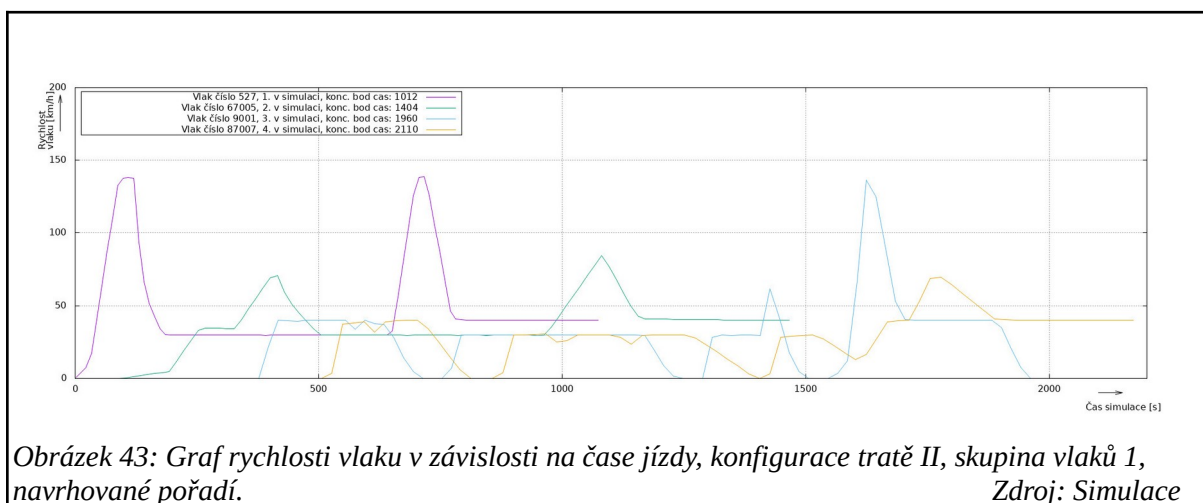


Konfigurace tratě II, skupina vlaků 1, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 17.

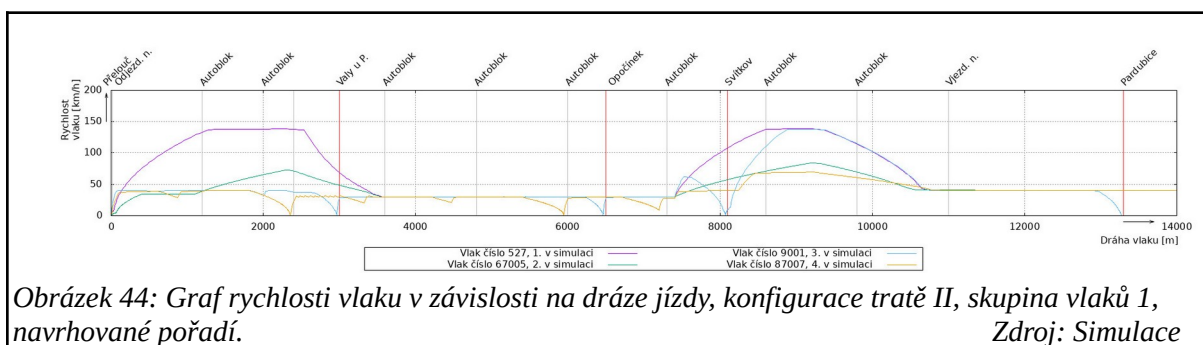
Tabulka 17: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

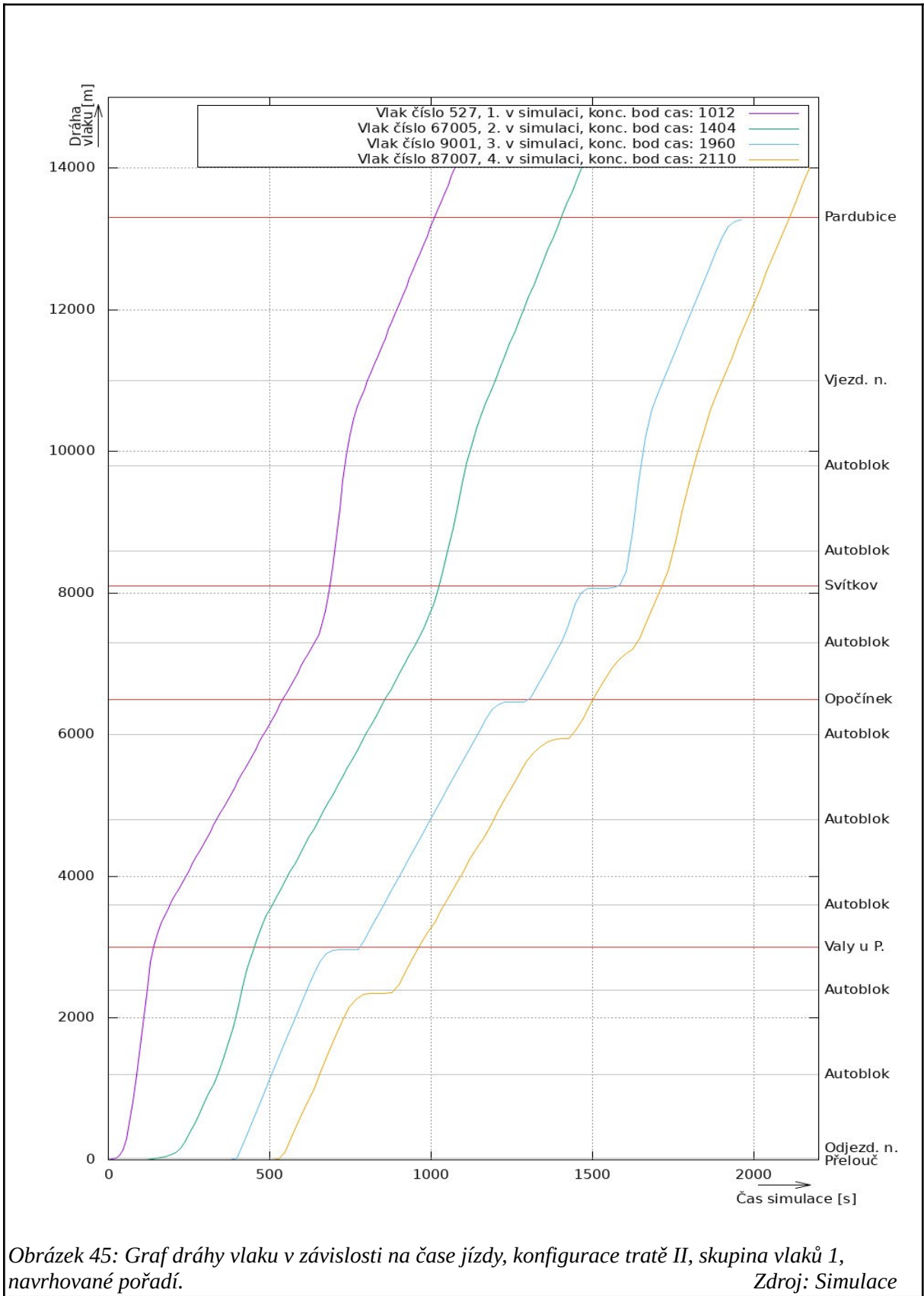
Trať II, sada 1, současnost		Trať II, sada 1, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	998	527	1012
9001	1556	67005	1404
67005	1725	9001	1960
87007	1969	87007	2110



Obrázek 43: Graf rychlosti vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě II, skupina vlaků 1, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace



Obrázek 44: Graf rychlosti vlaku v závislosti na dráze jízdy, konfigurace tratě II, skupina vlaků 1, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace



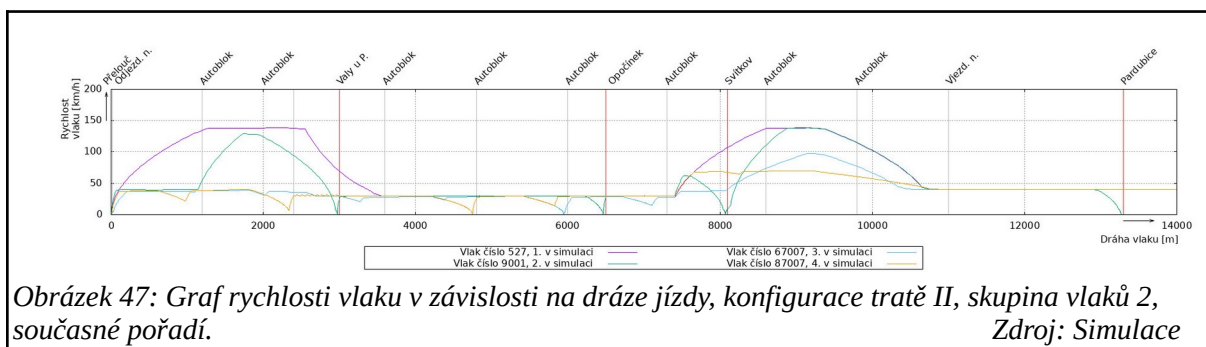
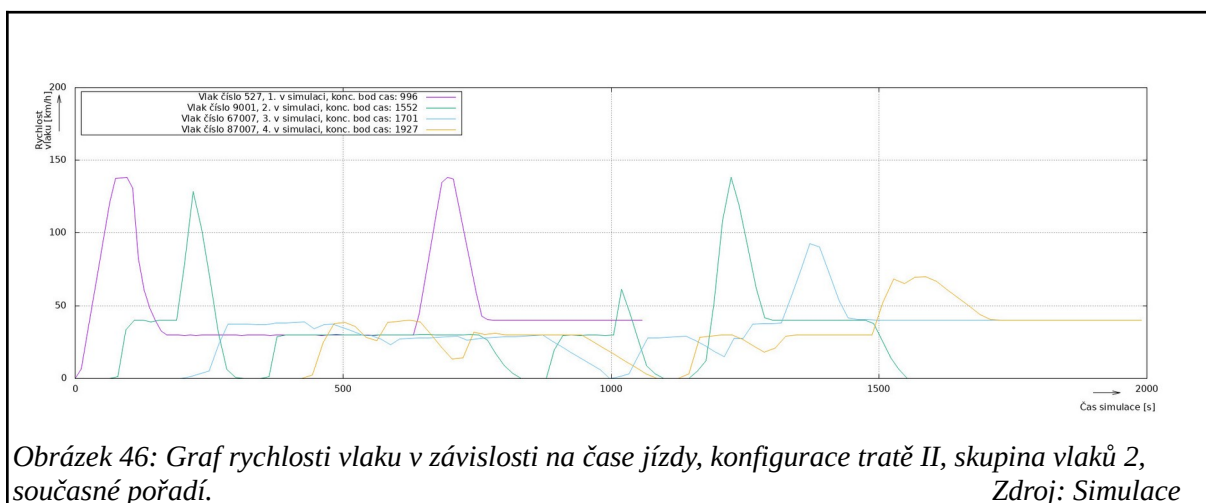
Obrázek 45: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě II, skupina vlaků 1, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace

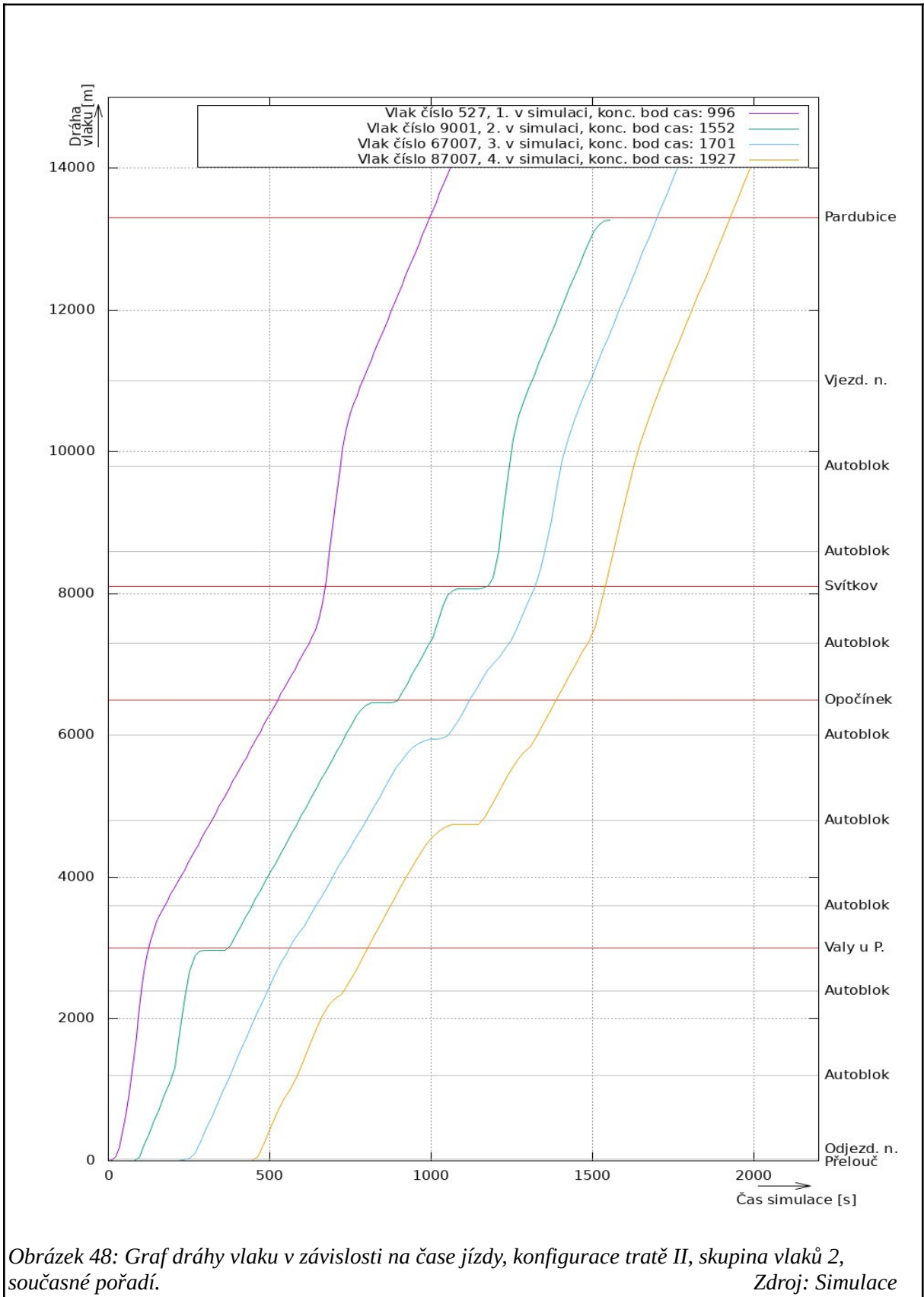
Konfigurace tratě II, skupina vlaků 2, pořadí současné, výsledky v tabulce 18.

Tabulka 18: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať II, sada 2, současnost		Trať II, sada 2, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	996	527	996
9001	1552	67007	1285
67007	1701	9001	1862
87007	1927	87007	2011





Obrázek 48: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě II, skupina vlaků 2, současné pořadí.

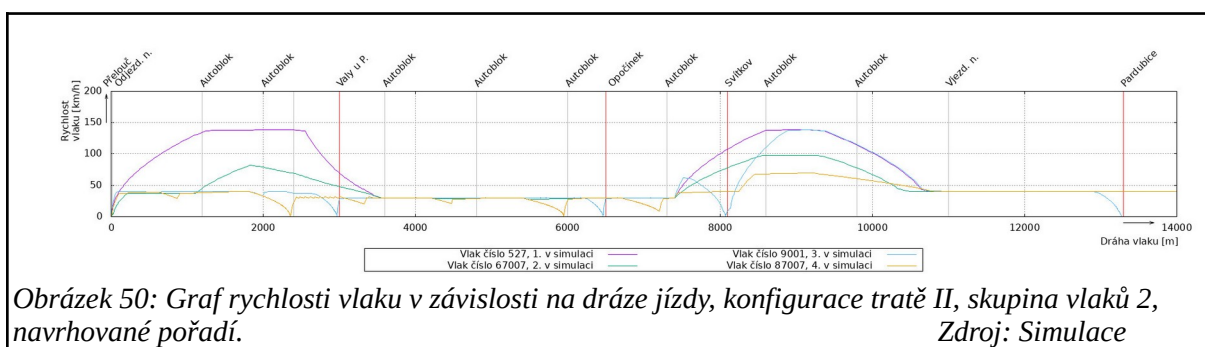
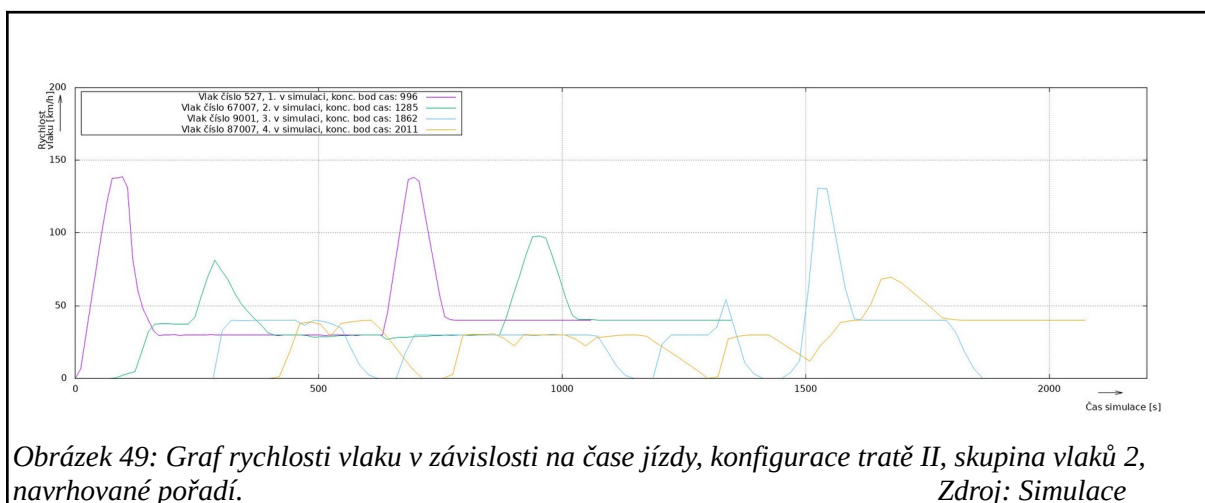
Zdroj: Simulace

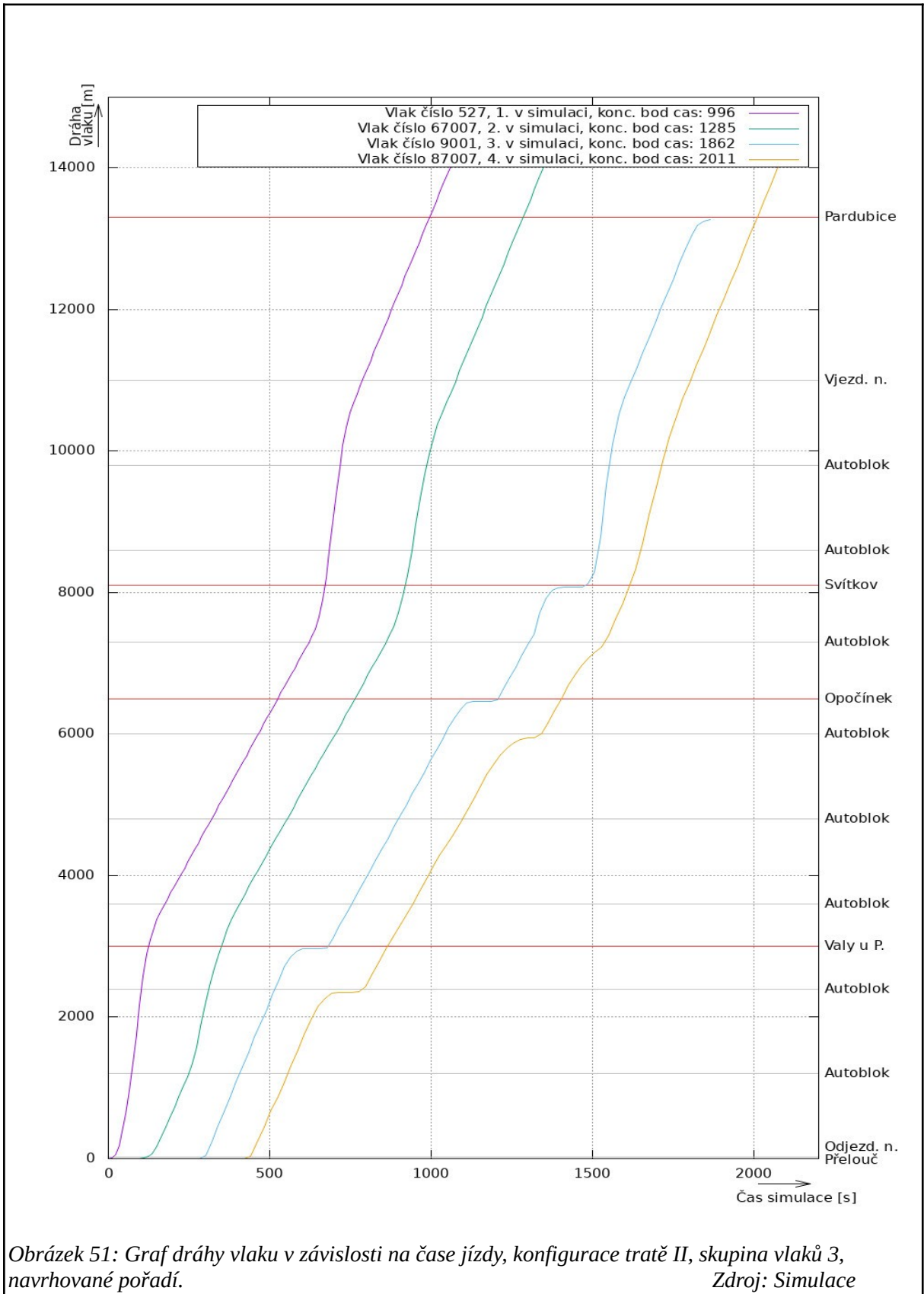
Konfigurace tratě II, skupina vlaků 2, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 19.

Tabulka 19: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať II, sada 2, současnost		Trať II, sada 2, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	996	527	996
9001	1552	67007	1285
67007	1701	9001	1862
87007	1927	87007	2011



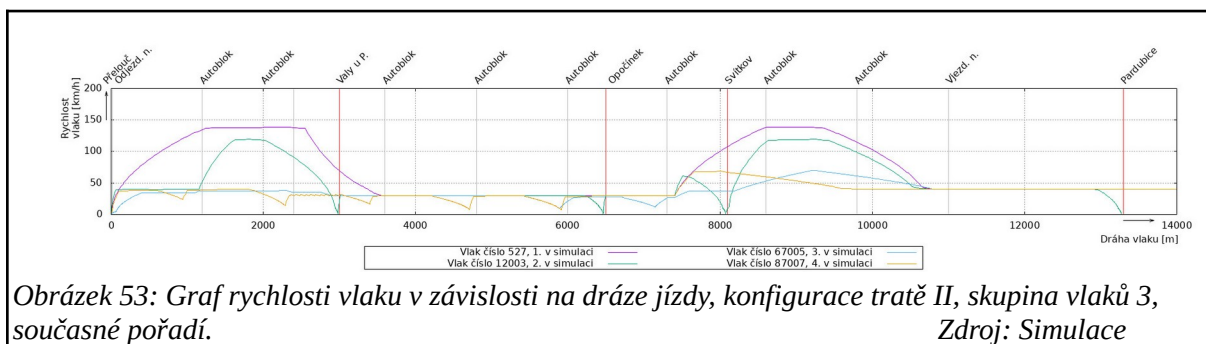
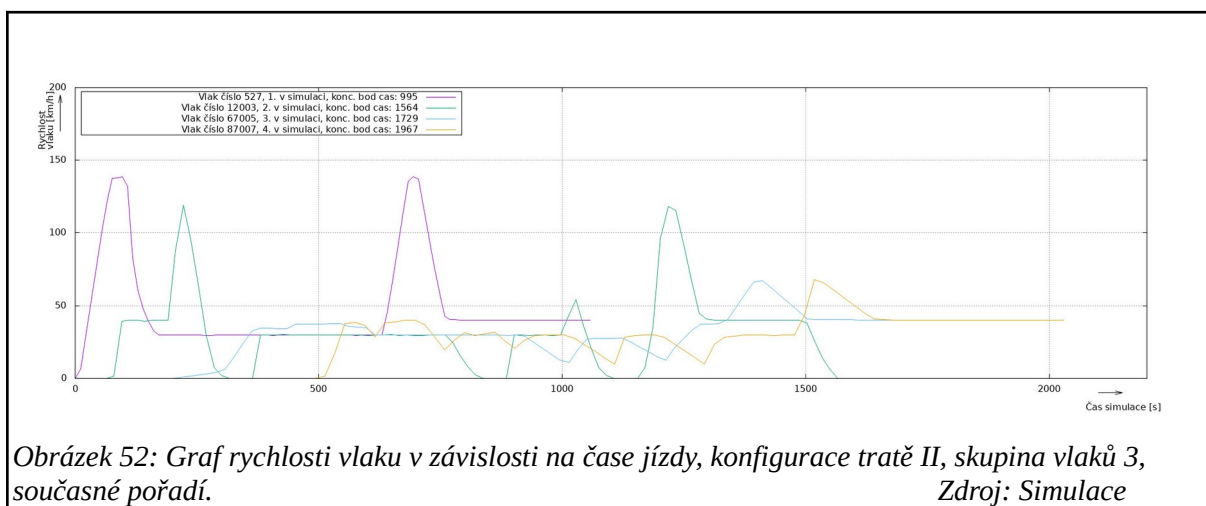


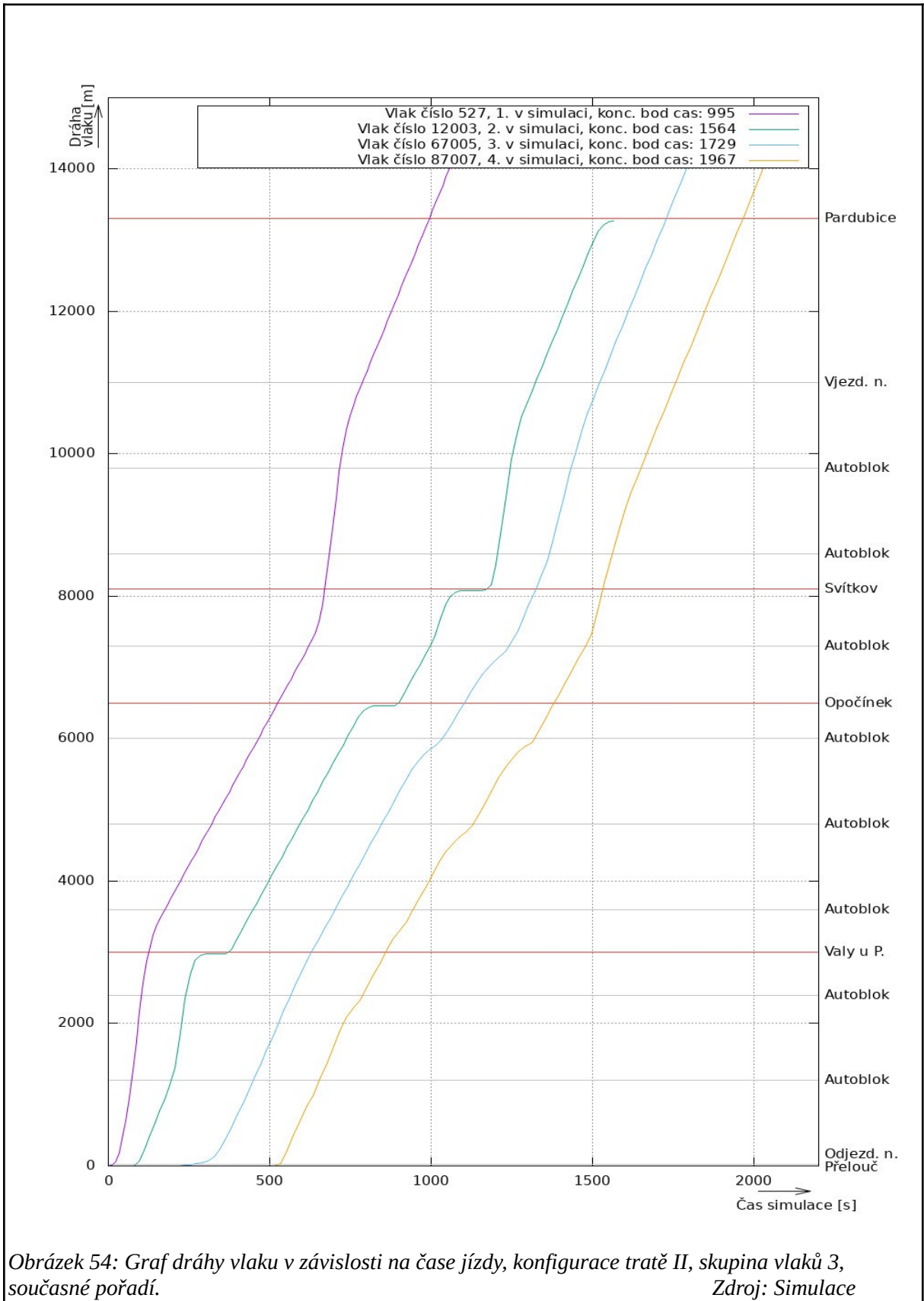
Konfigurace tratě II, skupina vlaků 3, pořadí současné, výsledky v tabulce 20.

Tabulka 20: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať II, sada 3, současnost		Trať II, sada 3, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	995	527	1011
12003	1564	67005	1404
67005	1729	12003	1968
87007	1967	87007	2112





Obrázek 54: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě II, skupina vlaků 3, současné pořadí. Zdroj: Simulace

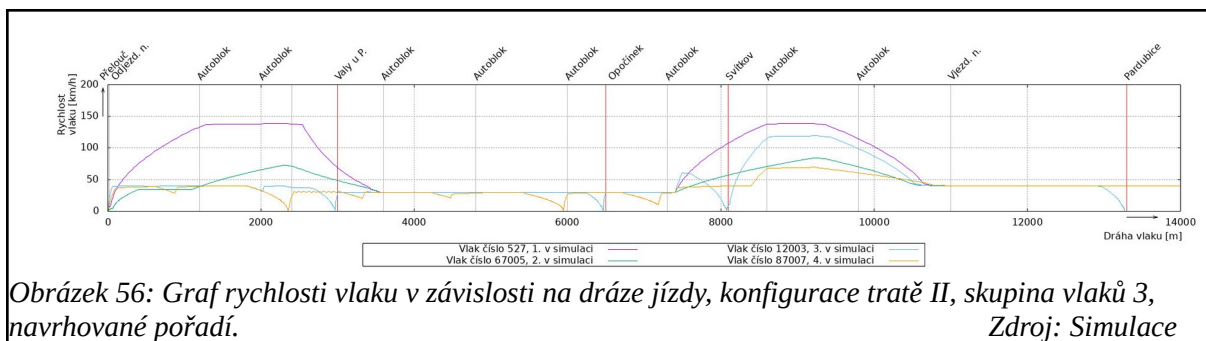
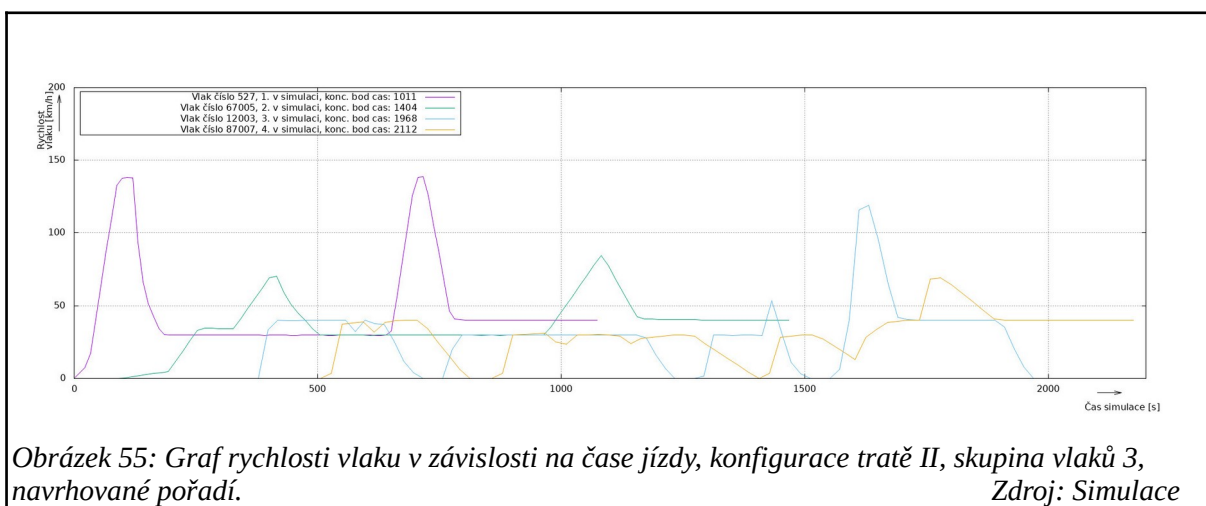


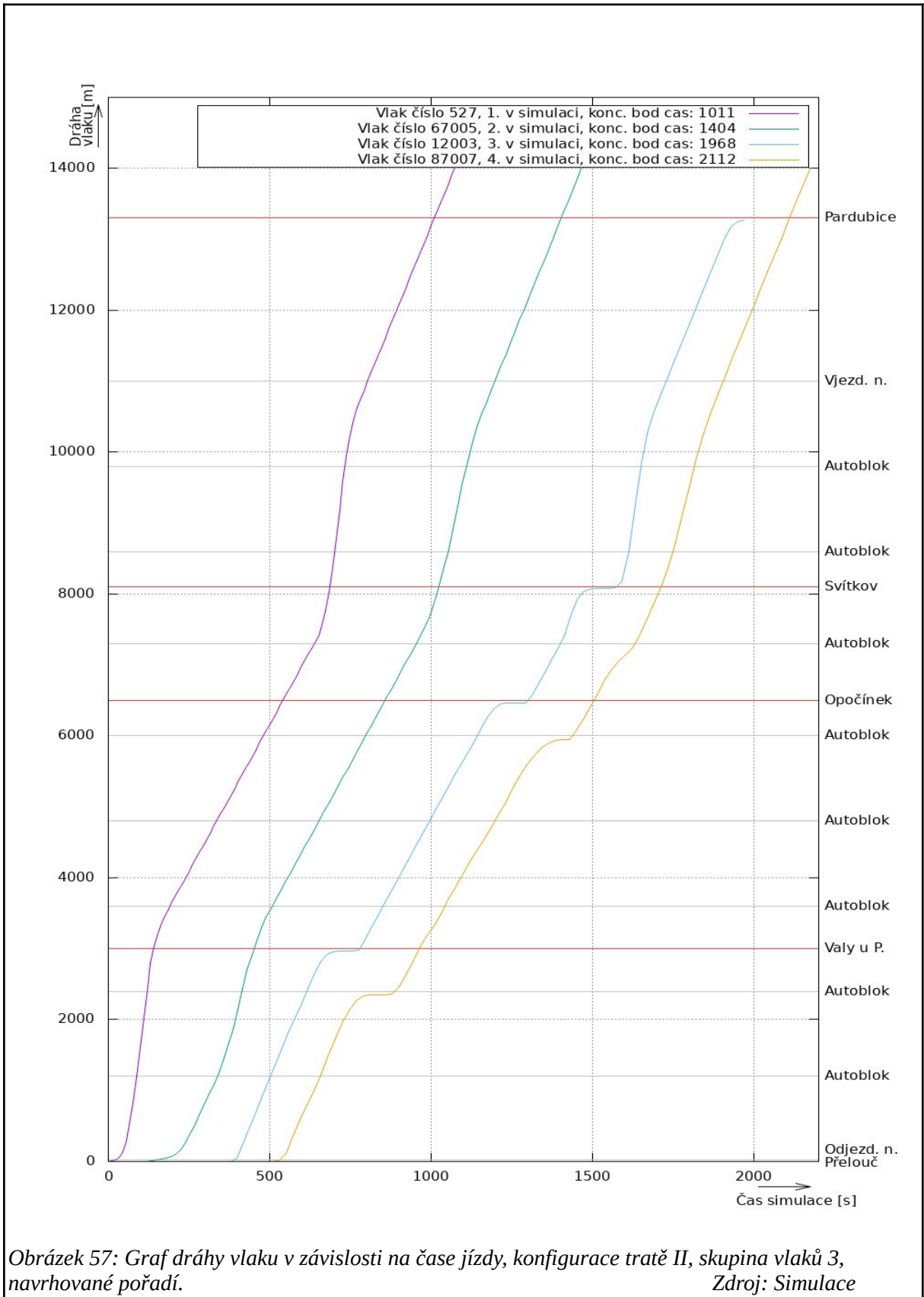
Konfigurace tratě II, skupina vlaků 3, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 21.

Tabulka 21: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať II, sada 3, současnost		Trať II, sada 3, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	995	527	1011
12003	1564	67005	1404
67005	1729	12003	1968
87007	1967	87007	2112





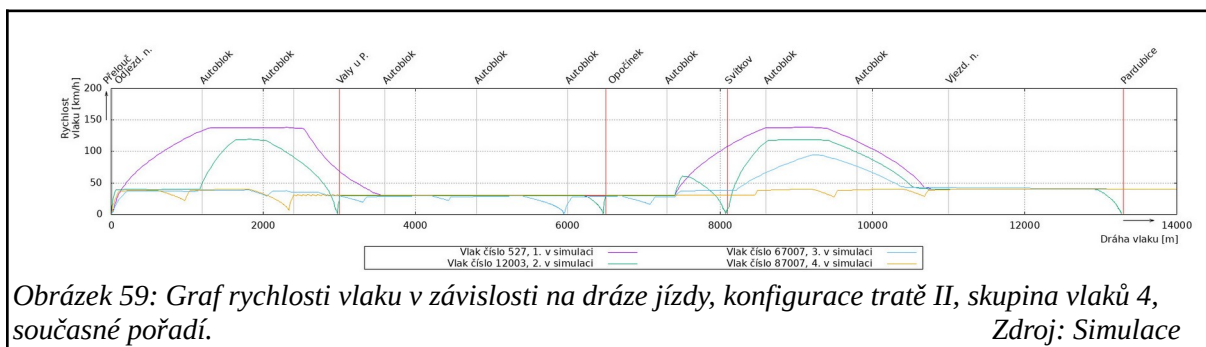
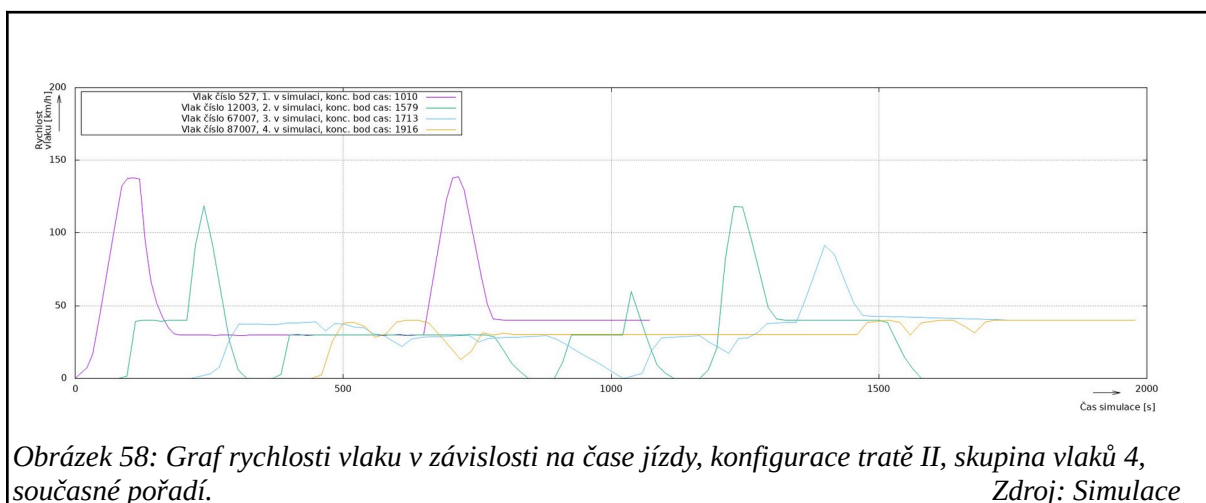
Obrázek 57: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě II, skupina vlaků 3, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace

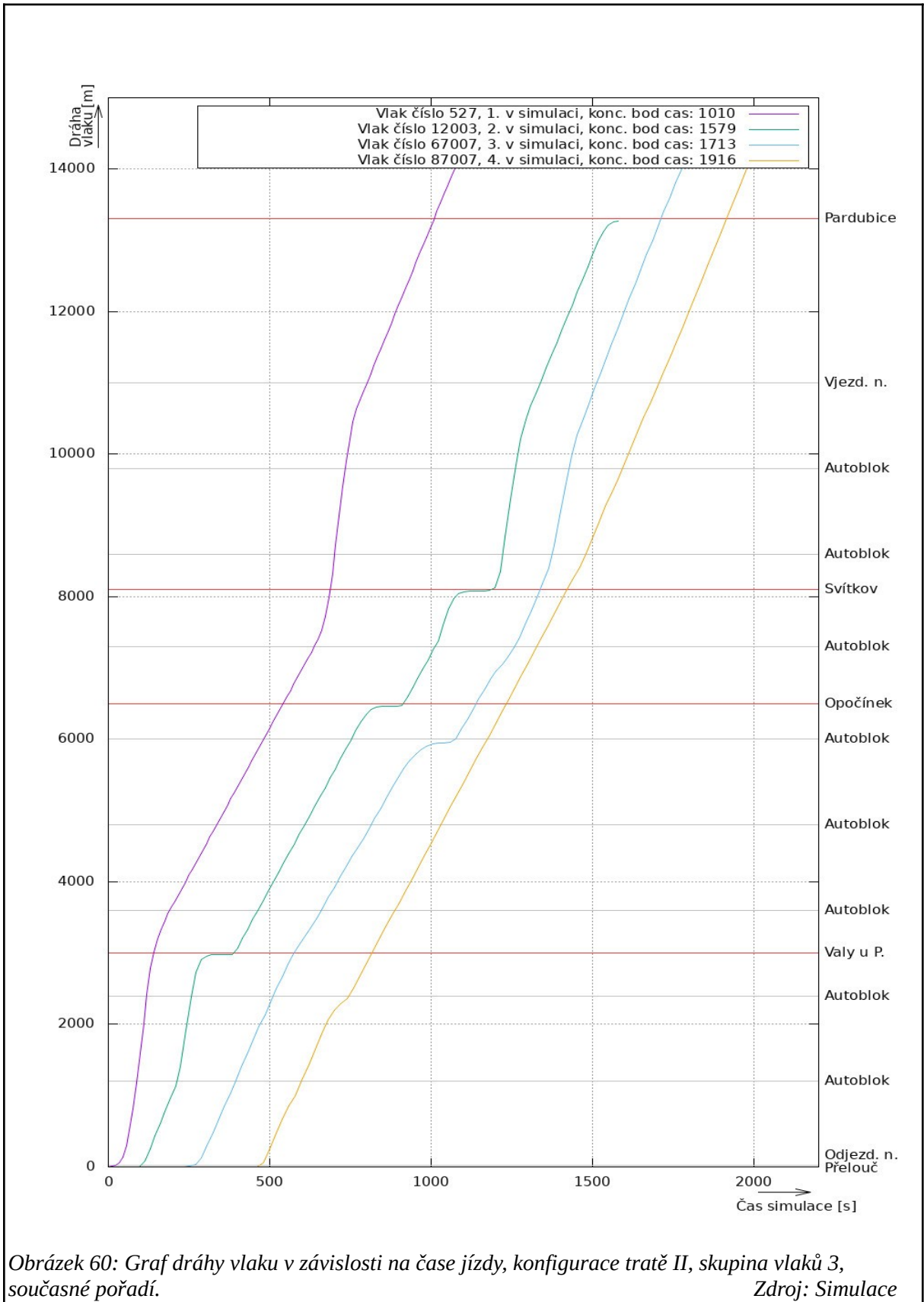
Konfigurace tratě II, skupina vlaků 4, pořadí současné, výsledky v tabulce 22.

Tabulka 22: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať II, sada 4, současnost		Trať II, sada 4, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	1010	527	995
12003	1579	67007	1221
67007	1713	12003	1813
87007	1916	87007	2011





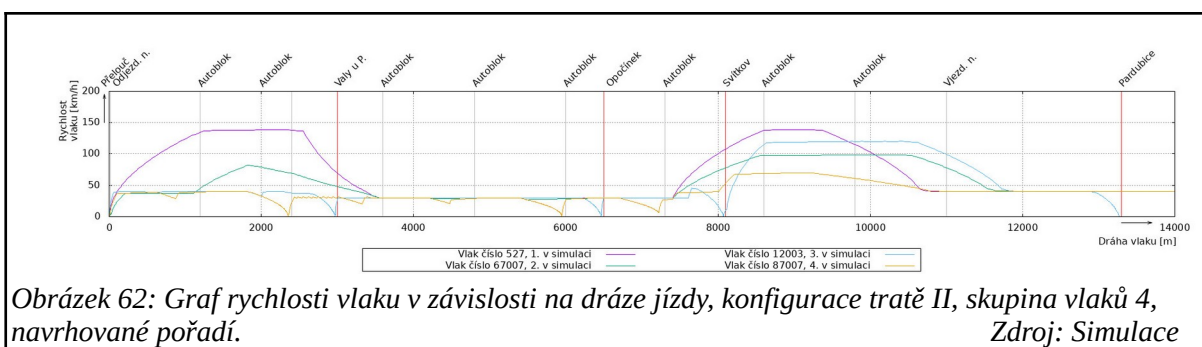
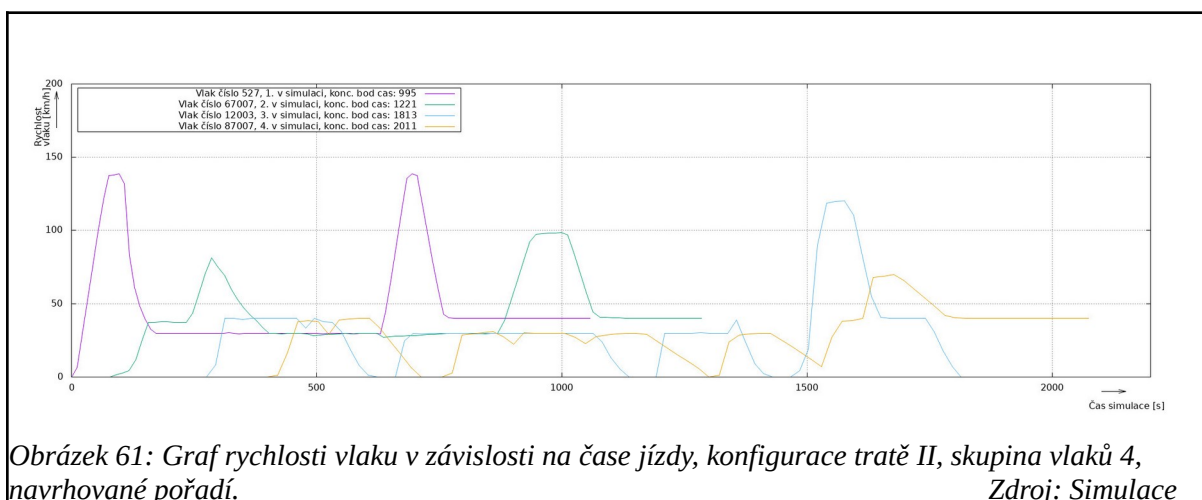
Obrázek 60: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě II, skupina vlaků 3, současné pořadí. Zdroj: Simulace

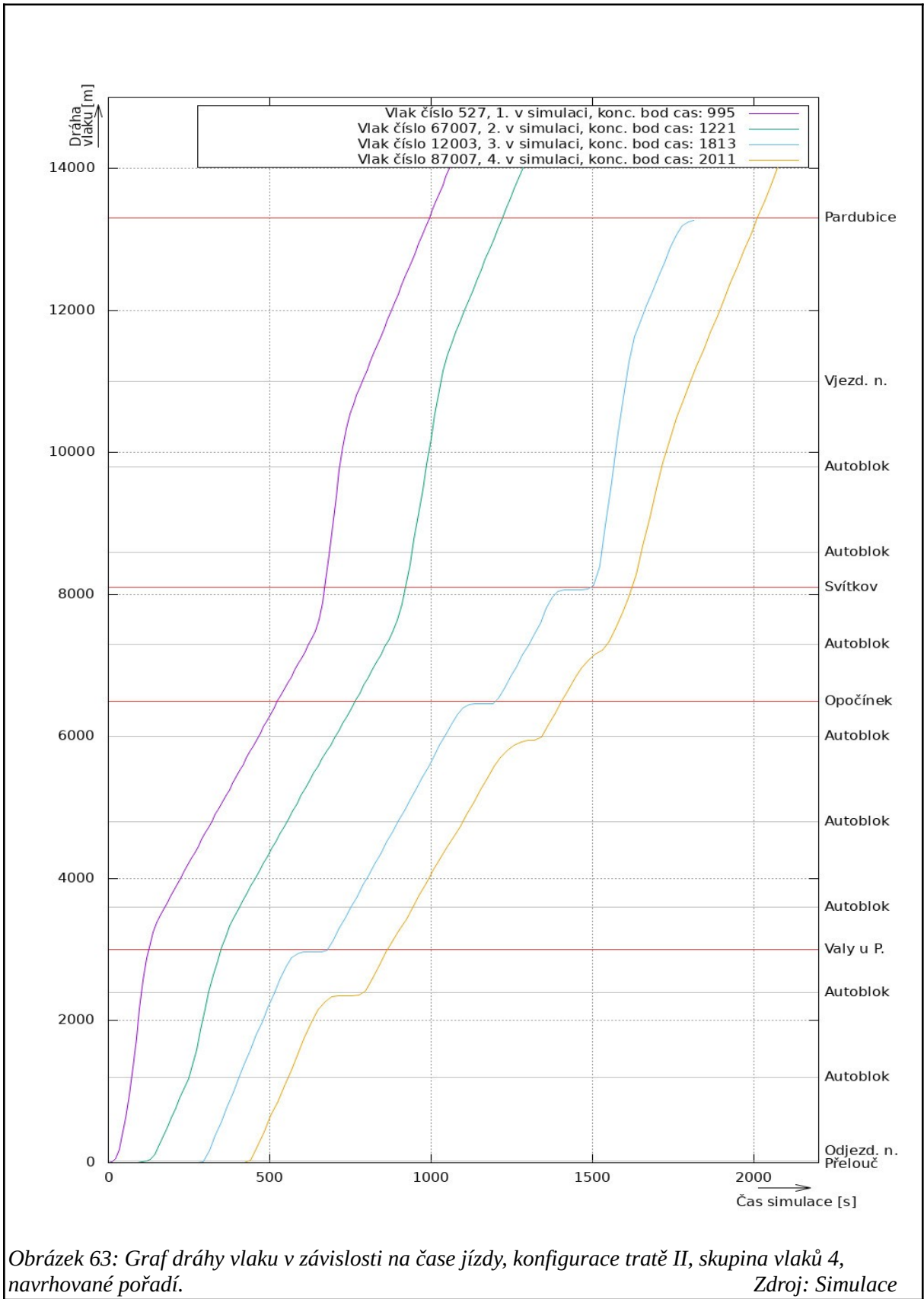
Konfigurace tratě II, skupina vlaků 4, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 23.

Tabulka 23: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať II, sada 4, současnost		Trať II, sada 4, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	1010	527	995
12003	1579	67007	1221
67007	1713	12003	1813
87007	1916	87007	2011





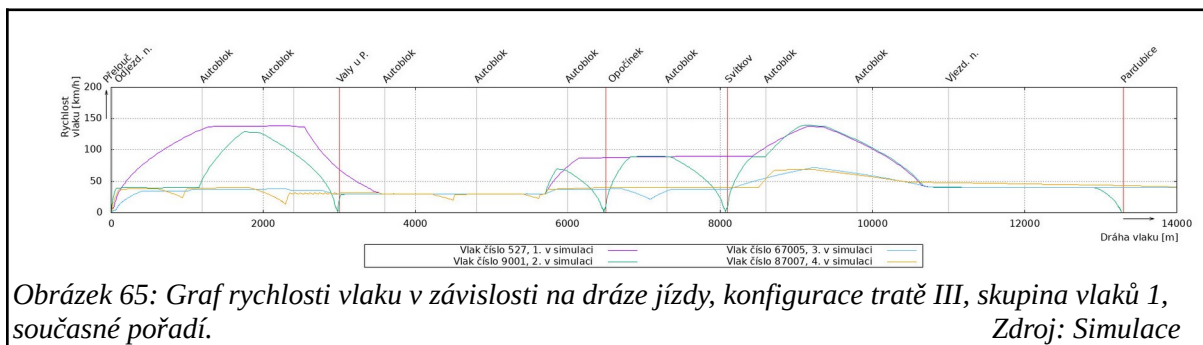
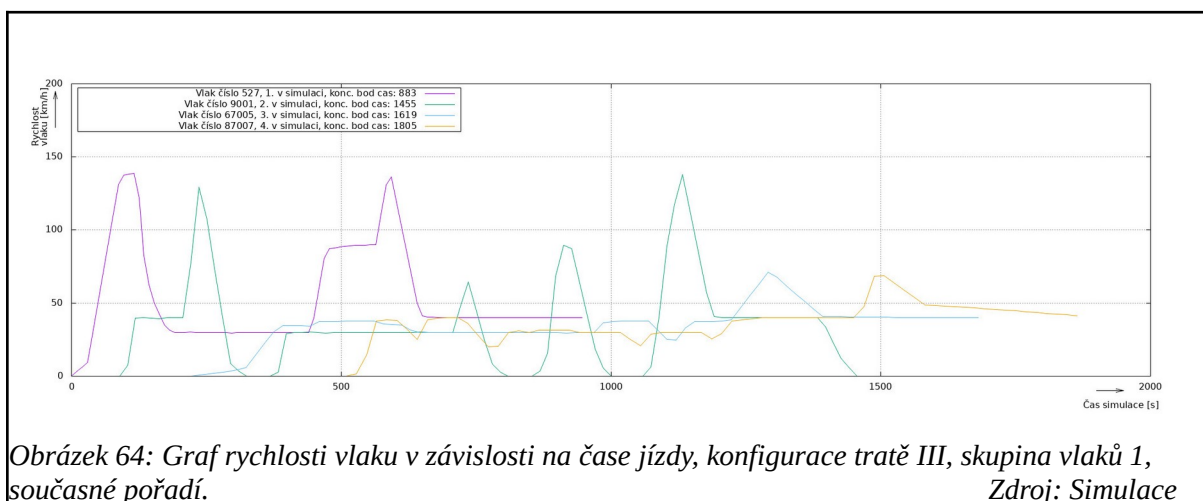
Obrázek 63: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě II, skupina vlaků 4, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace

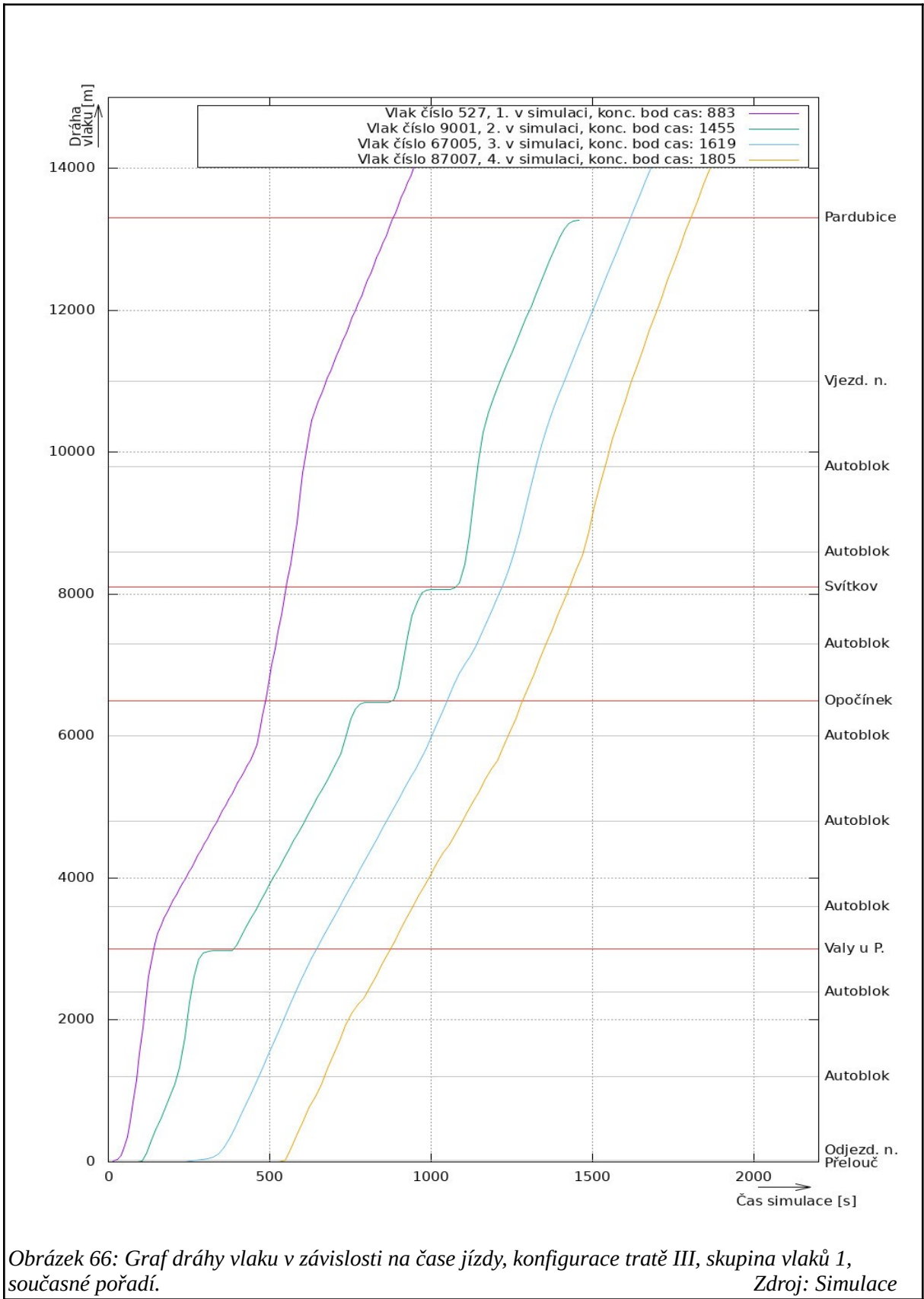
Konfigurace tratě III, skupina vlaků 1, pořadí současné, výsledky v tabulce 24.

Tabulka 24: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať III, sada 1, současnost		Trať III, sada 1, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	883	527	882
9001	1455	67005	1267
67005	1619	9001	1853
87007	1805	87007	2007





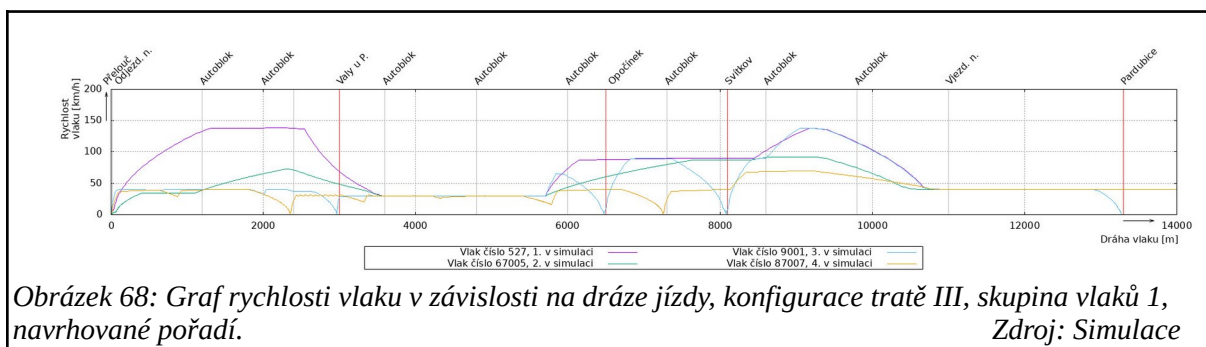
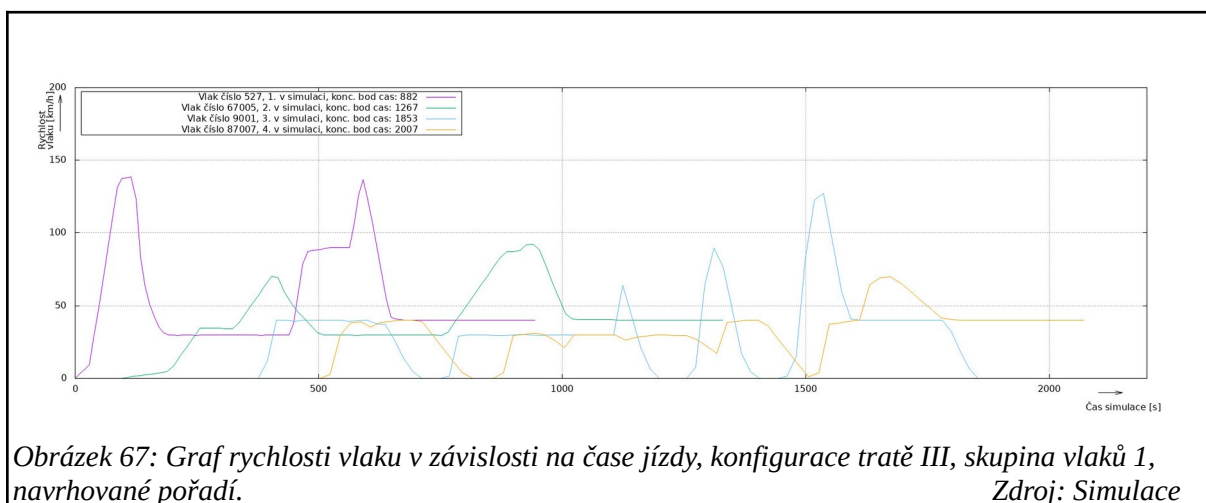


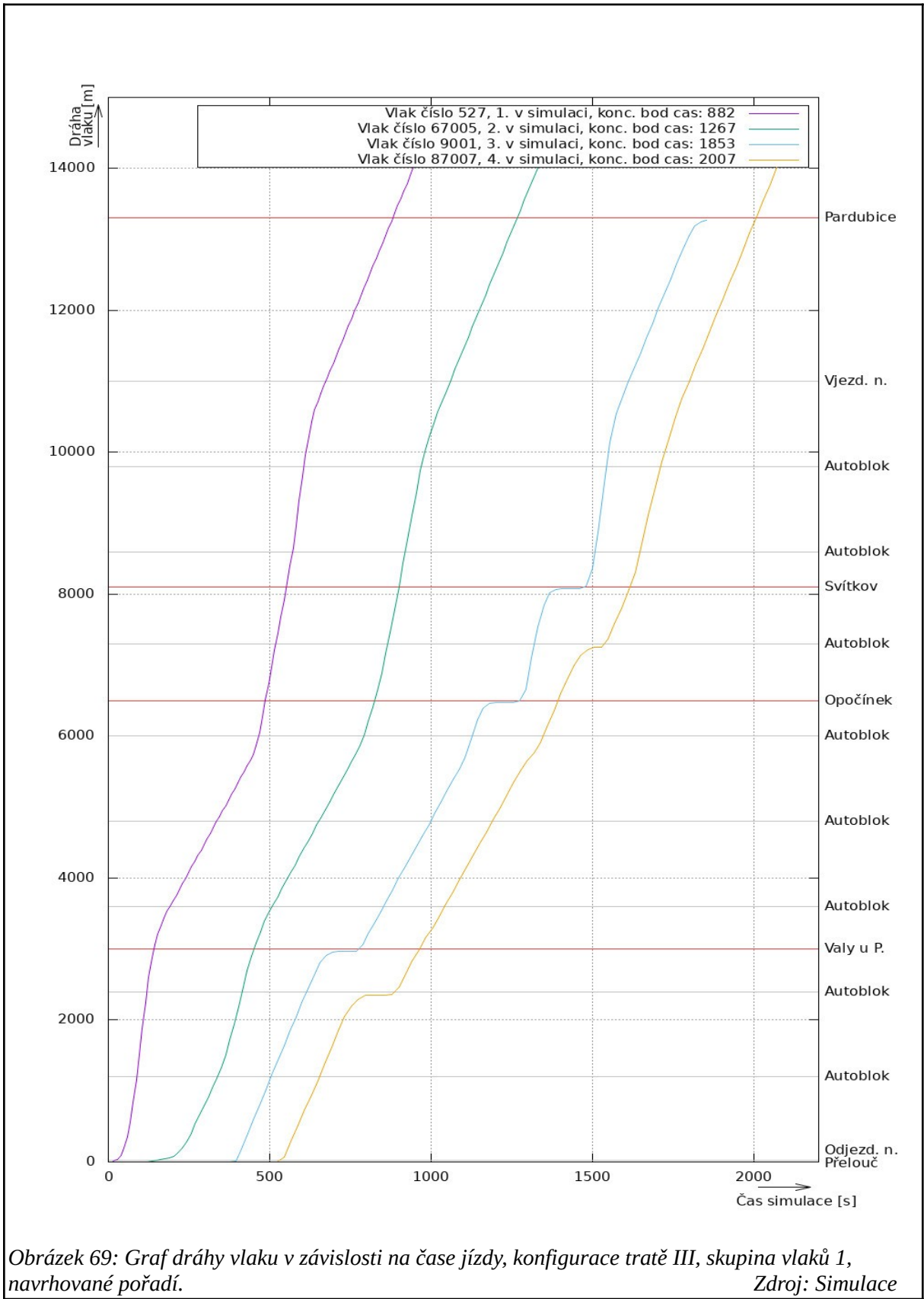
Konfigurace tratě III, skupina vlaků 1, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 25.

Tabulka 25: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať III, sada 1, současnost		Trať III, sada 1, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	883	527	882
9001	1455	67005	1267
67005	1619	9001	1853
87007	1805	87007	2007



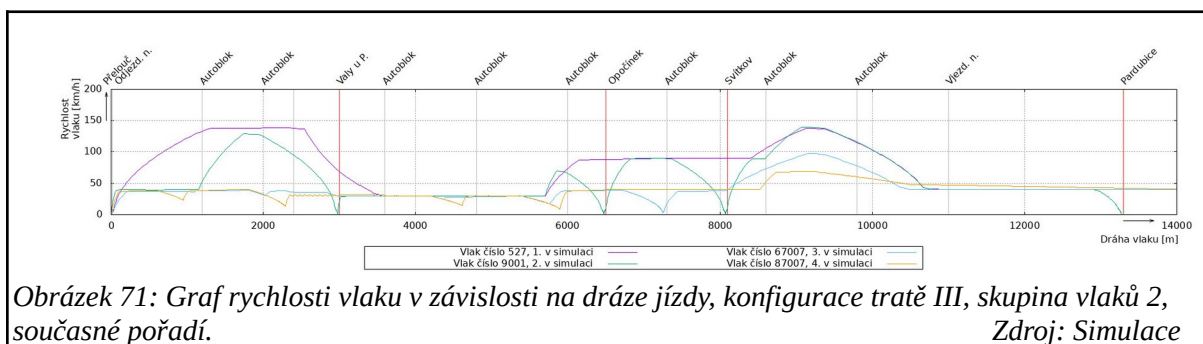
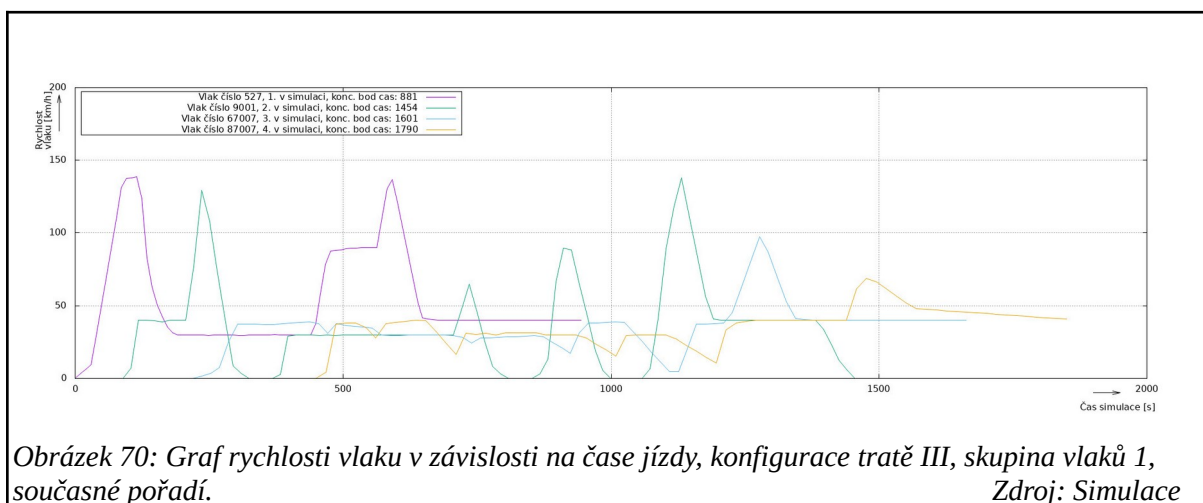


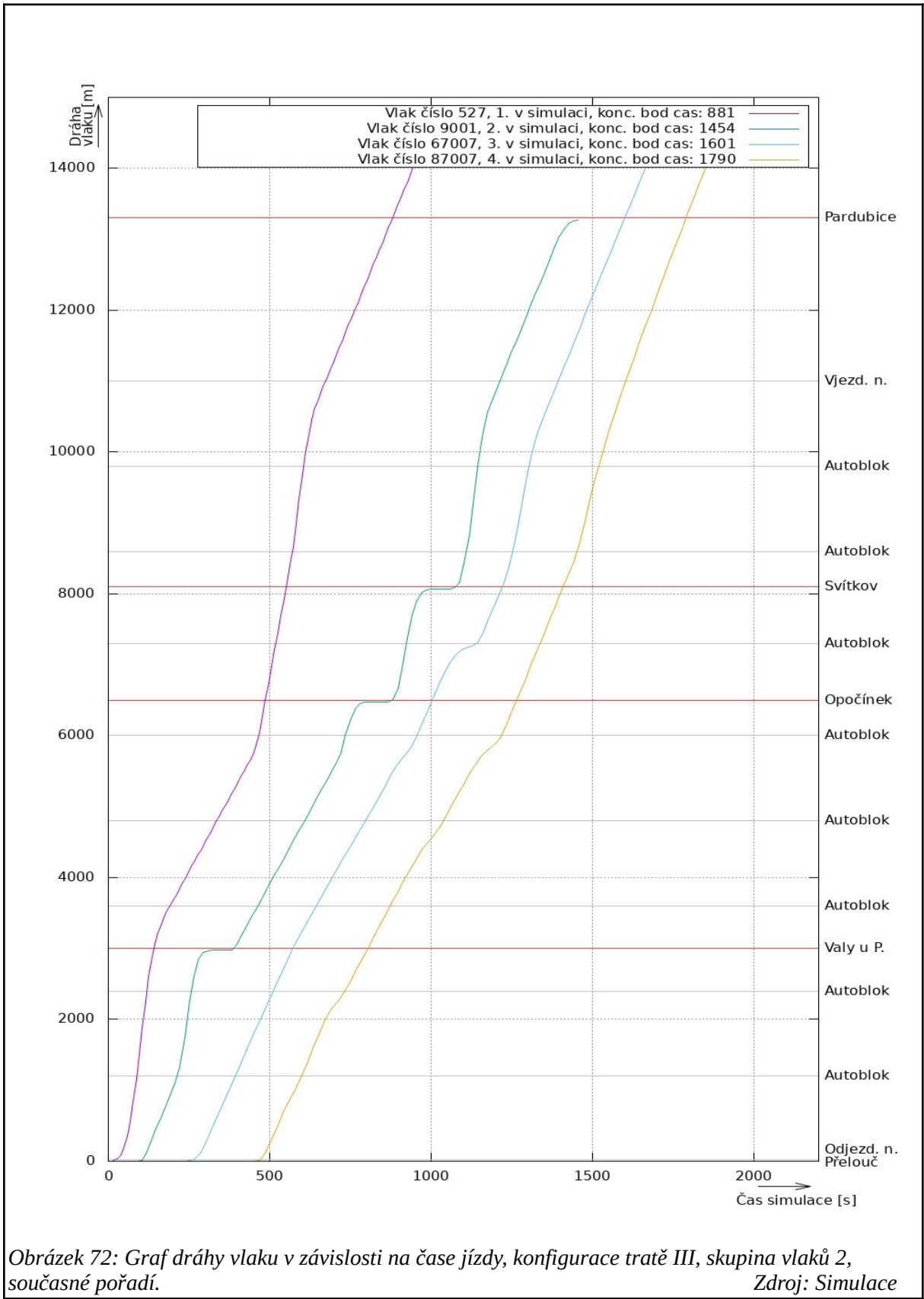
Konfigurace tratě III, skupina vlaků 2, pořadí současné, výsledky v tabulce 26.

Tabulka 26: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať III, sada 2, současnost		Trať III, sada 2, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	881	527	791
9001	1454	67007	1147
67007	1601	9001	1753
87007	1790	87007	1908





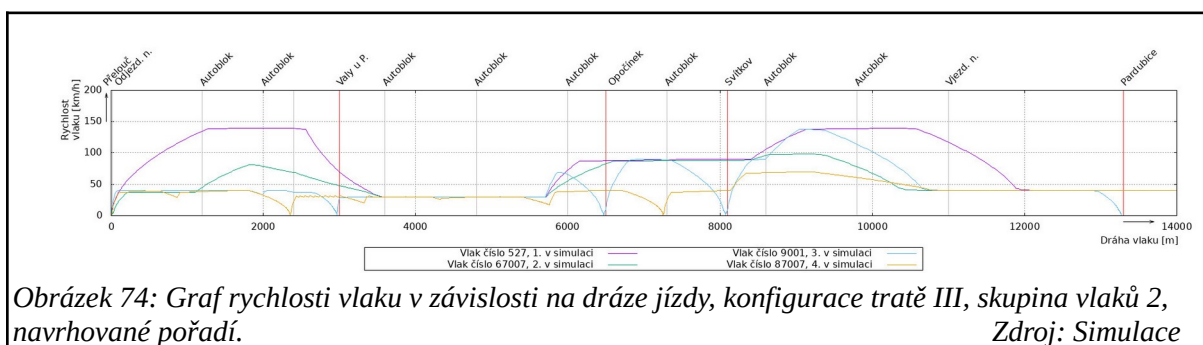
Obrázek 72: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě III, skupina vlaků 2, současné pořadí. Zdroj: Simulace

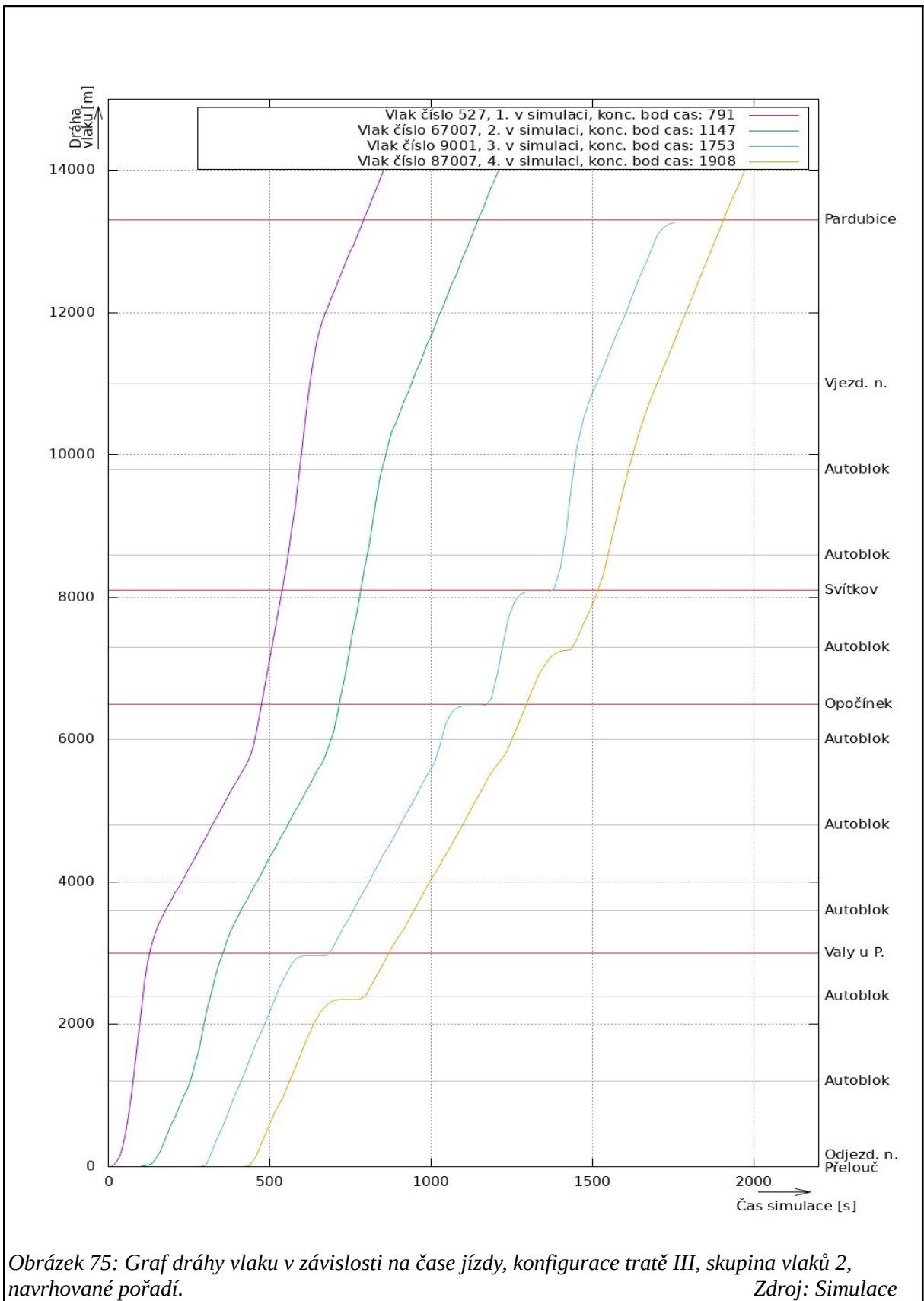
Konfigurace tratě III, skupina vlaků 2, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 27.

Tabulka 27: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať III, sada 3, současnost		Trať III, sada 3, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	870	527	789
12003	1458	67005	1250
67005	1617	12003	1843
87007	1886	87007	1991





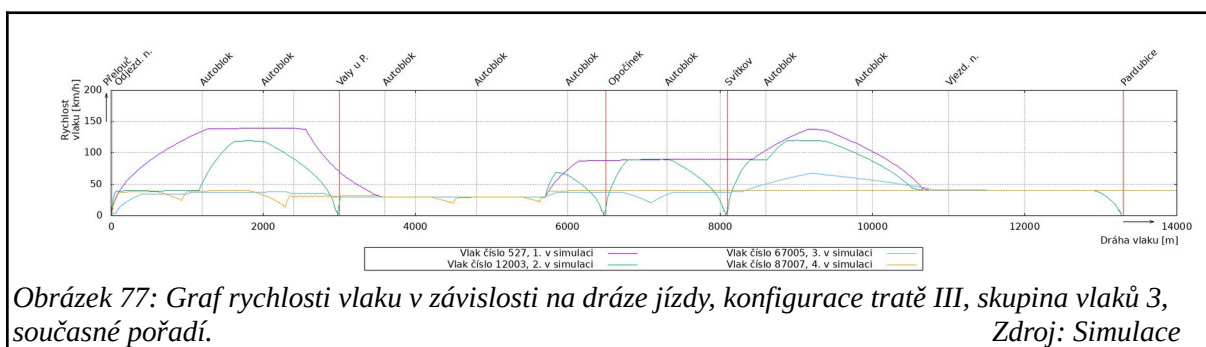
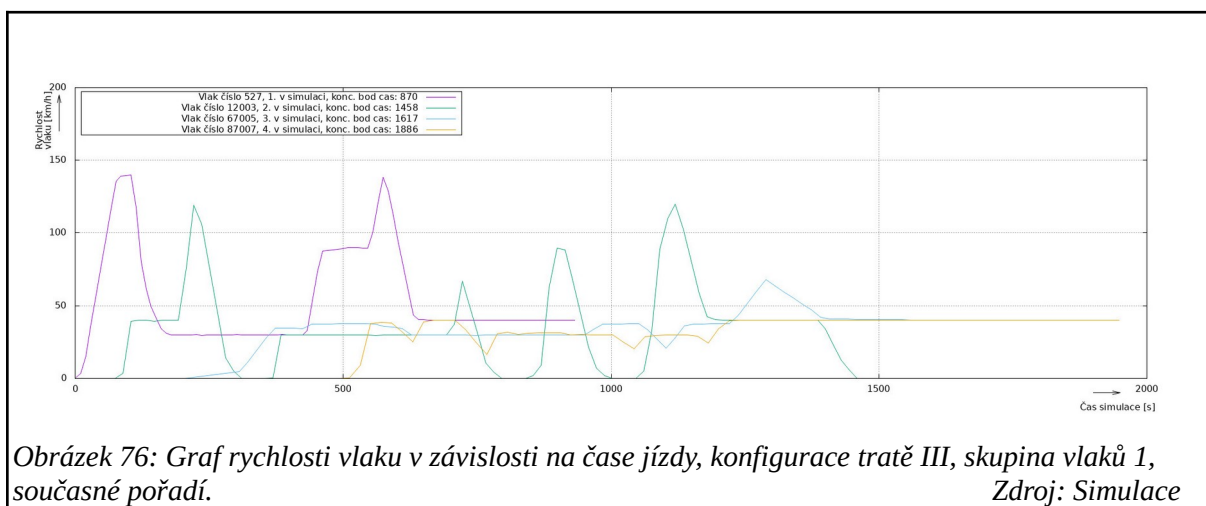
Obrázek 75: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě III, skupina vlaků 2, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace

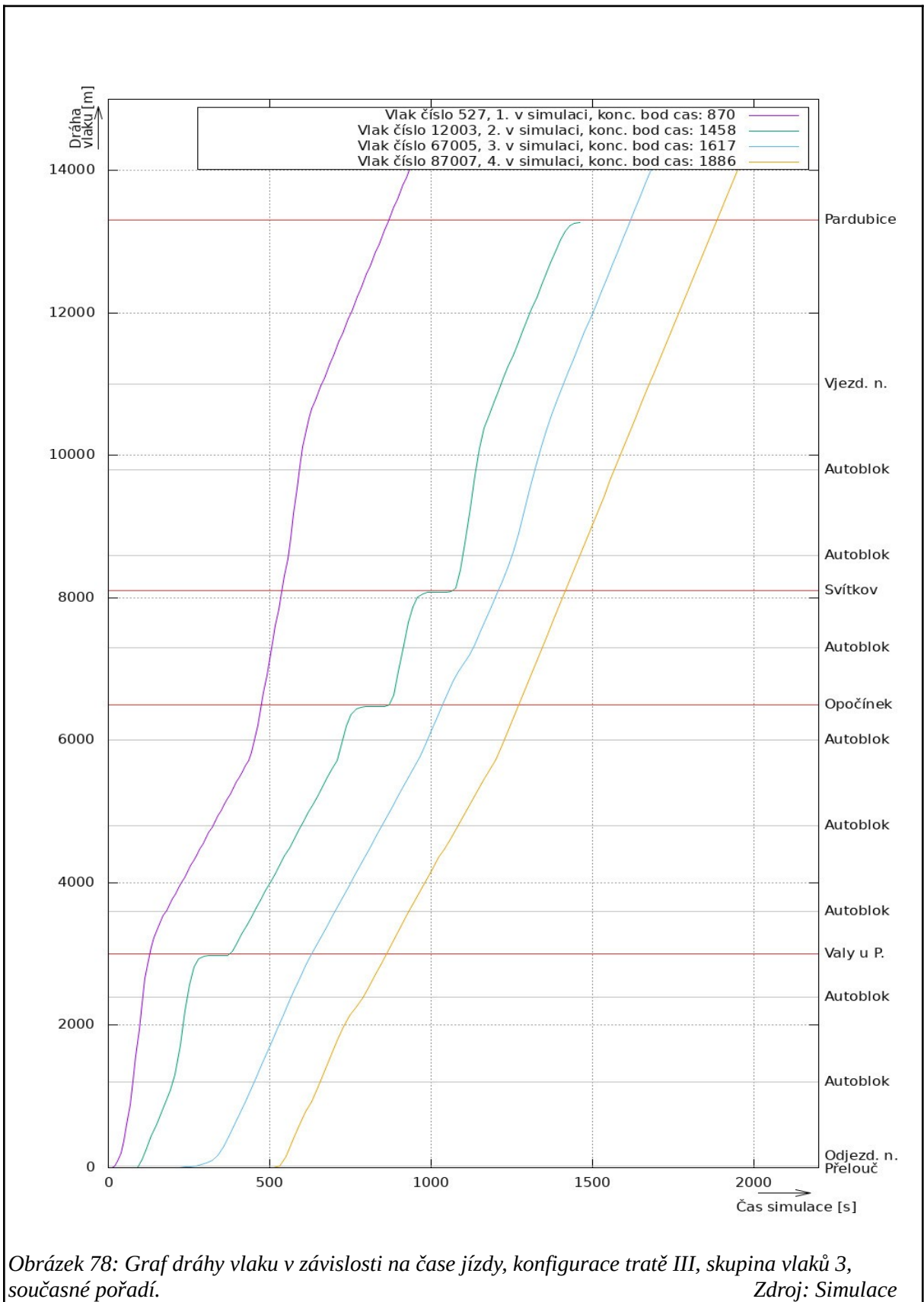
Konfigurace tratě III, skupina vlaků 3, pořadí současné, výsledky v tabulce 28.

Tabulka 28: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať III, sada 3, současnost		Trať III, sada 3, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	870	527	789
12003	1458	67005	1250
67005	1617	12003	1843
87007	1886	87007	1991





Obrázek 78: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě III, skupina vlaků 3, současné pořadí. Zdroj: Simulace

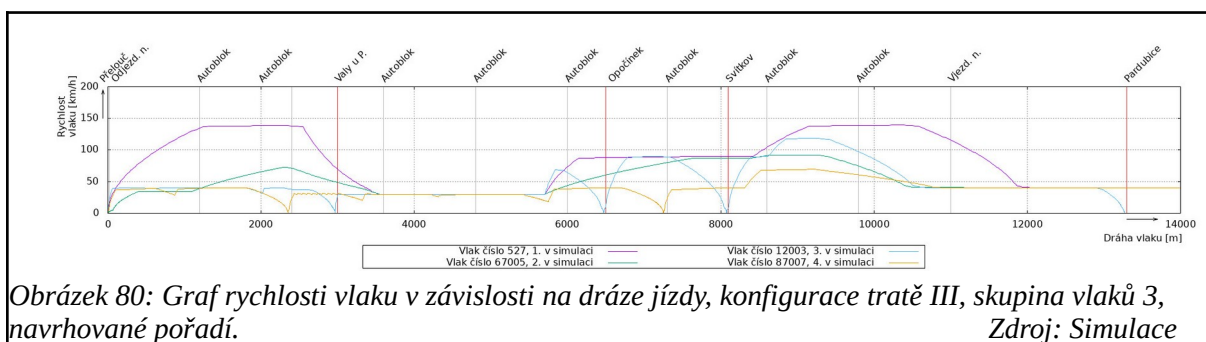
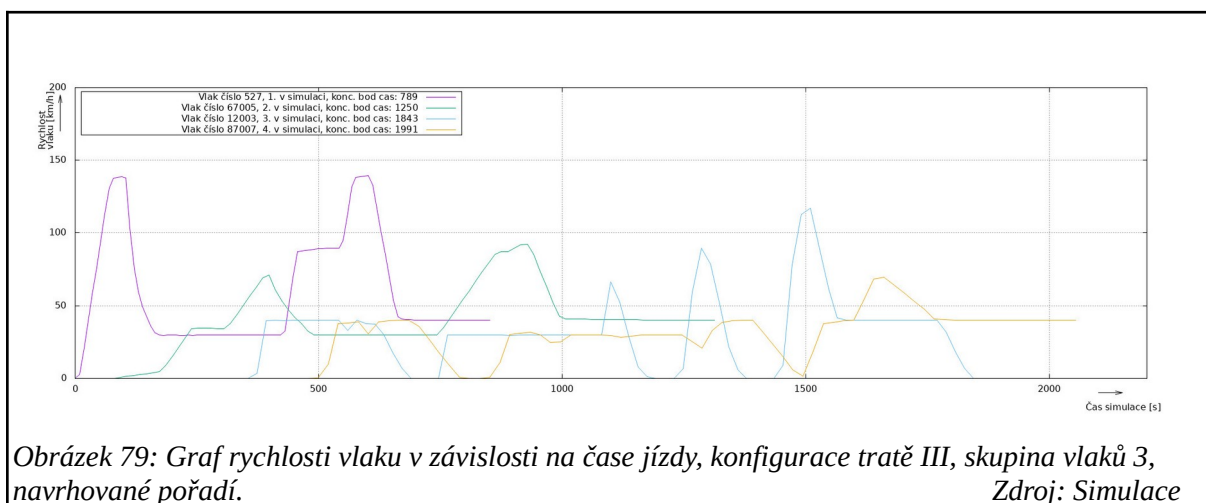


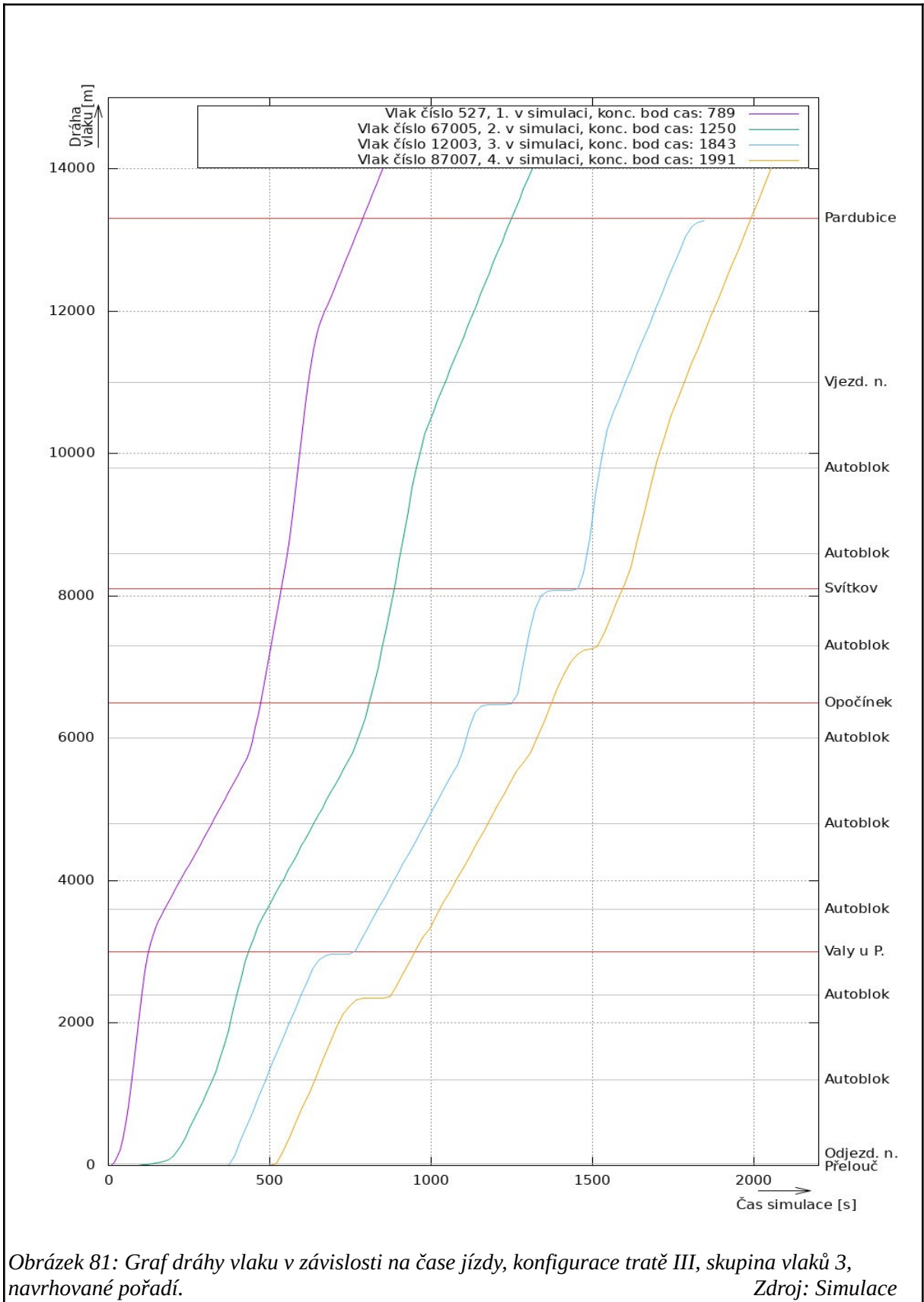
Konfigurace tratě III, skupina vlaků 3, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 29.

Tabulka 29: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať III, sada 3, současnost		Trať III, sada 3, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	870	527	789
12003	1458	67005	1250
67005	1617	12003	1843
87007	1886	87007	1991





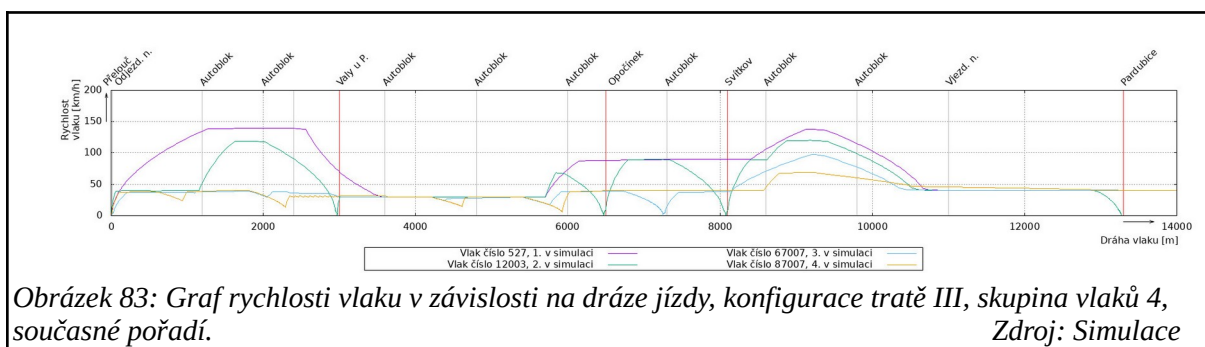
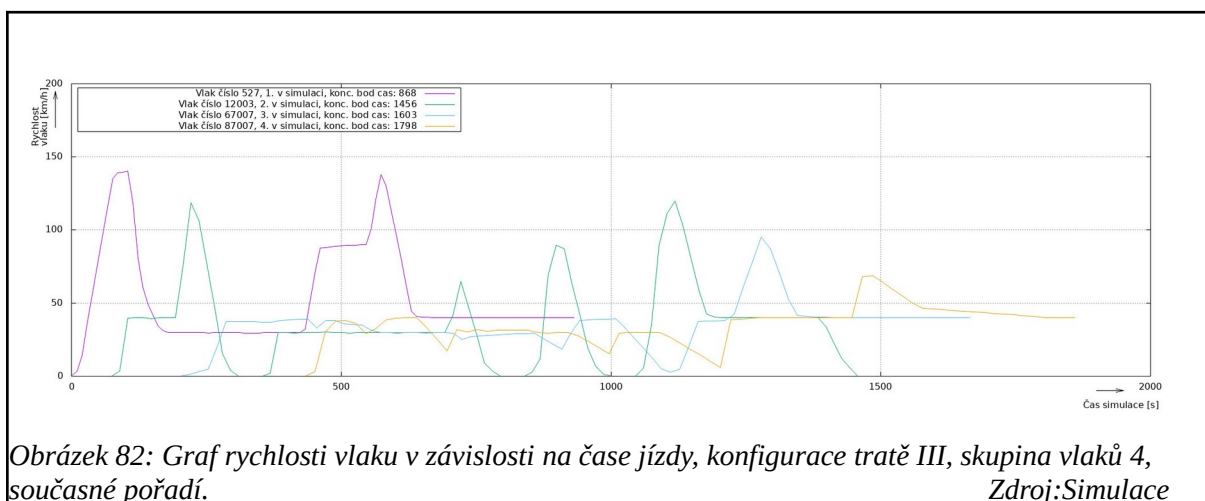
Obrázek 81: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě III, skupina vlaků 3, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace

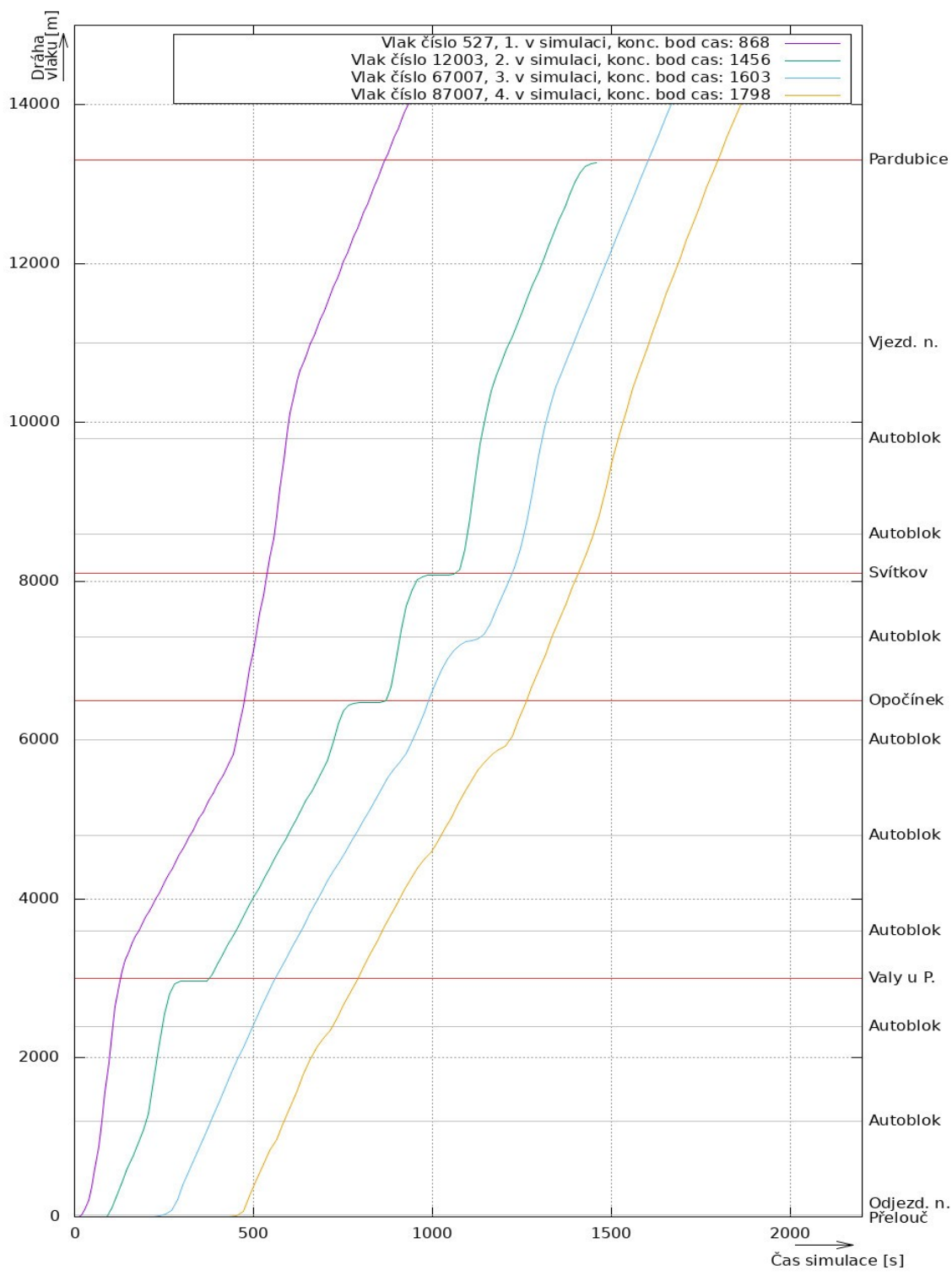
Konfigurace tratě III, skupina vlaků 4, pořadí současné, výsledky v tabulce 30.

Tabulka 30: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať III, sada 4, současnost		Trať III, sada 4, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	868	527	868
12003	1456	67007	1146
67007	1603	12003	1765
87007	1798	87007	1910





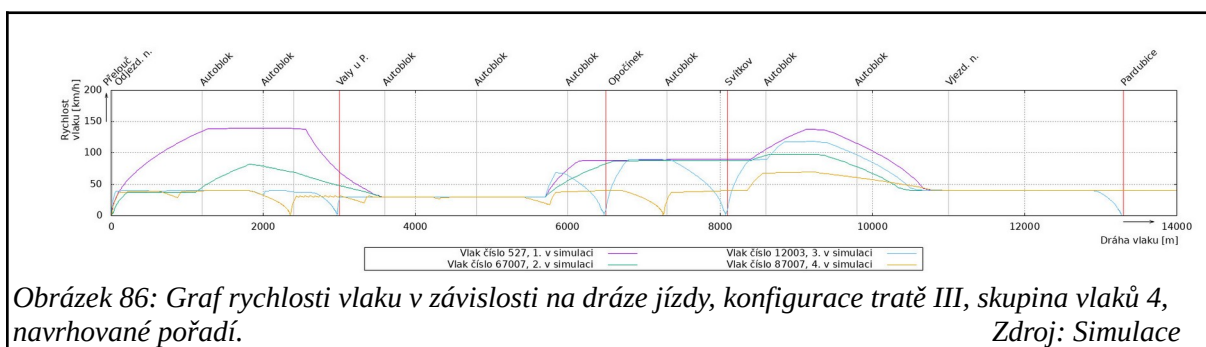
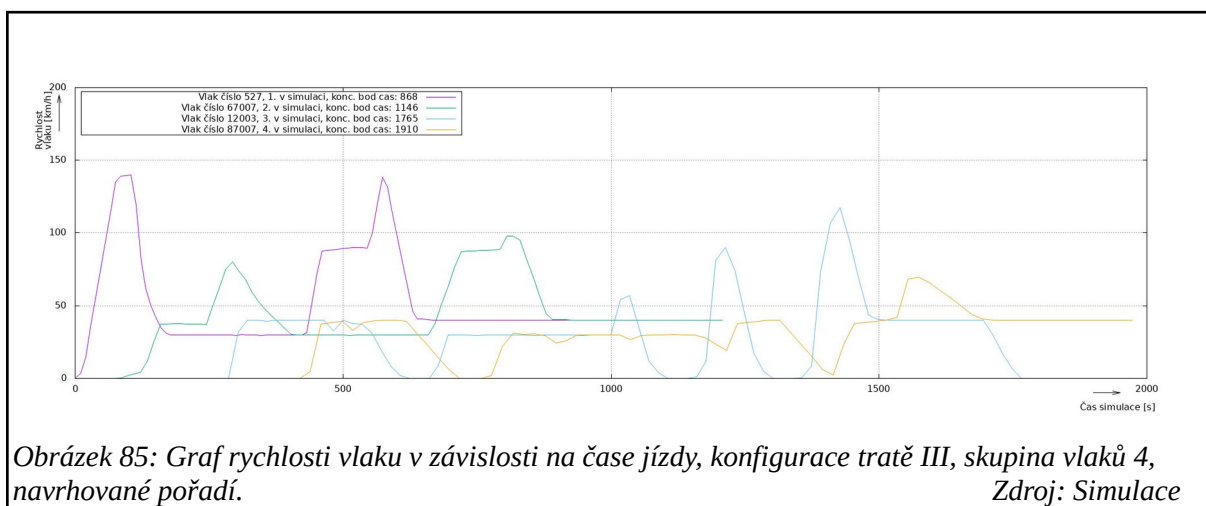
Obrázek 84: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě III, skupina vlaků 4, současné pořadí. Zdroj: Simulace

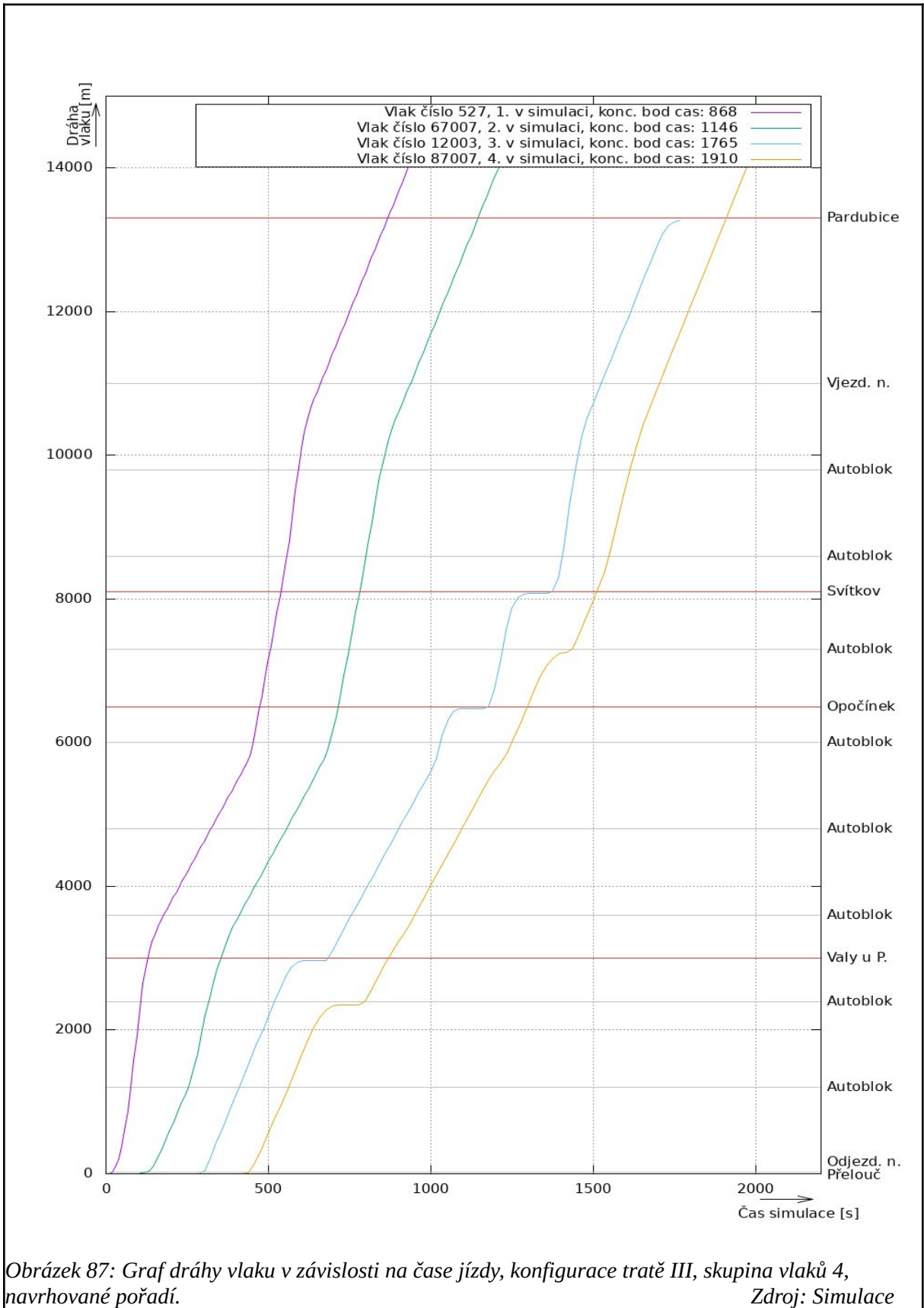
Konfigurace tratě III, skupina vlaků 4, pořadí navrhované, výsledky v tabulce 31.

Tabulka 31: Časy průjezdů koncovým bodem.

Zdroj: Simulace

Trať III, sada 4, současnost		Trať III, sada 4, návrh	
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]
527	868	527	868
12003	1456	67007	1146
67007	1603	12003	1765
87007	1798	87007	1910





Obrázek 87: Graf dráhy vlaku v závislosti na čase jízdy, konfigurace tratě III, skupina vlaků 4, navrhované pořadí. Zdroj: Simulace

## 6.15 Metodika vyhodnocení výsledků

Vyhodnocení výsledků bylo provedeno na základě multikriteriální analýzy, bodovým ohodnocením následujících kritérií:

1. Čas průjezdu posledního vlaku ze skupiny přední dopravnou. Jedna sekunda = 1 bod. Toto kritérium vyplývá z požadavku projet vlaky úsekem za nejkratší možnou dobu.
2. Rozdíl mezi časy průjezdů nebo zastavení prvního a druhého vlaku ve skupině v přední dopravě. Jedna sekunda = 1,5 bodu. Toto kritérium vychází ze suboptimálního svazkování, jak o něm pojednává kapitola 3.2 a je graficky znázorněno obrázkem 2. Na počátek svazku zařadíme vlaky s nejvyšší průměrnou rychlostí a každý následující vlak ve svazku by měl mít průměrnou rychlost stejnou nebo nižší než vlak předchozí. Menší rozdíl mezi časy prvního a druhého vlaku znamená vyšší průměrnou rychlost druhého vlaku.
3. Počet neplánovaných zastavení vlaků v úseku. Jedno zastavení = 100 bodů.

Čím vyšší bodové skóre, tím horší výsledek. Hodnocení bylo provedeno dvojí:

1. Čistě časové hledisko průjezdu vlaků, tedy podle kritérií 1. a 2.
2. K časovému hodnocení byl přidán i ekonomický pohled, kdy každé neplánované zastavení vlaku znamená ekonomickou ztrátu. K bodovému skóre bylo připočteno kritérium 3.

Vzorec pro výpočet bodového hodnocení I.:

$$bh_I = t_{pvp} + (t_{2vp} - t_{1vp}) * 1,5$$

kde	$bh_I$	celkový počet bodů ohodnocení I.
	$t_{pvp}$	čas výskytu posledního vlaku v koncovém bodě
	$t_{2vp}$	čas výskytu druhého vlaku v koncovém bodě
	$t_{1vp}$	čas výskytu prvního vlaku v koncovém bodě

Koncovým bodem simulace je myšlena vzdálenost přední dopravnou v simulaci od začátku simulovaného úseku.

Vzorec pro výpočet bodového hodnocení II.:

$$bh_{ii} = bh_i + \sum nz$$

kde

- $bh_{ii}$  celkový počet bodů ohodnocení II.
- $bh_i$  celkový počet bodů ohodnocení I.
- $\sum nz$  počet všech neplánovaných zastavení vlaků

## 6.16 Vyhodnocení výsledků

Trat' konfigurace I, přehled hodnocení variant, tabulky 32, 33, 34, a 35.

Tabulka 32: Hodnocení výsledků simulace tratě I. sada vlaků 1. Zdroj: Simulace

Trat' I, sada 1, současnost			Trat' I., sada 1, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	619	0	527	619	0
9001	1169	0	67005	951	0
67005	1340	0	9001	1446	0
87007	1599	0	87007	1602	1
Bodové hodnocení I.		2424	Bodové hodnocení I.		2100
Bodové hodnocení II.		2424	Bodové hodnocení II.		2200

Tabulka 33: Hodnocení výsledků simulace tratě I. sada vlaků 2. Zdroj: Simulace

Trat' I, sada 2, současnost			Trat' I., sada 2, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	619	0	527	552	0
9001	1169	0	67007	850	0
67007	1368	1	9001	1364	0
87007	1605	1	87007	1519	1
Bodové hodnocení I.		2430	Bodové hodnocení I.		1966
Bodové hodnocení II.		2630	Bodové hodnocení II.		2066



Tabulka 34: Hodnocení výsledků simulace tratě I. sada vlaků 3. Zdroj: Simulace

Trať I, sada 3, současnost			Trať I., sada 3, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	624	0	527	619	0
12003	1188	0	67005	949	0
67005	1352	1	12003	1458	0
87007	1605	0	87007	1604	1
Bodové hodnocení I.		2451	Bodové hodnocení I.		2099
Bodové hodnocení II.		2551	Bodové hodnocení II.		2199

Tabulka 35: Hodnocení výsledků simulace tratě I. sada vlaků 4. Zdroj: Simulace

Trať I, sada 4, současnost			Trať I., sada 4, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	635	0	527	619	0
12003	1199	0	67007	785	0
67007	1377	1	12003	1299	0
87007	1614	1	87007	1501	1
Bodové hodnocení I.		2460	Bodové hodnocení I.		1750
Bodové hodnocení II.		2660	Bodové hodnocení II.		1850

V traťové konfiguraci s povolenými rychlostmi tak, aby vlaky byly omezeny pouze jejich technickými možnostmi, byla ve všech testech vyhodnocena lépe navrhovaná varianta pořadí jízdy vlaků v obou hodnotících kritériích. V časech sady 1 a 3, tabulka 32 a 34, je vidět vliv rozjezdu těžkého Pn. Dle mého názoru je navrhovaná varianta stále lepší, než stávající řešení jízdy vlaků.

Trat' konfigurace II, přehled hodnocení variant, tabulky 36, 37, 38 a 39.

*Tabulka 36: Hodnocení výsledků simulace tratě II. sada vlaků 1. Zdroj: Simulace*

Trat' II, sada 1, současnost			Trat' II, sada 1, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	998	0	527	1012	0
9001	1556	0	67005	1404	0
67005	1725	0	9001	1960	0
87007	1969	0	87007	2110	2
Bodové hodnocení I.		2806	Bodové hodnocení I.		2698
Bodové hodnocení II.		2806	Bodové hodnocení II.		2898

*Tabulka 37: Hodnocení výsledků simulace tratě II. sada vlaků 2. Zdroj: Simulace*

Trat' II, sada 2, současnost			Trat' II, sada 2, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	996	0	527	996	0
9001	1552	0	67007	1285	0
67007	1701	1	9001	1862	0
87007	1927	1	87007	2011	2
Bodové hodnocení I.		2761	Bodové hodnocení I.		2445
Bodové hodnocení II.		2961	Bodové hodnocení II.		2645

*Tabulka 38: Hodnocení výsledků simulace tratě II. sada vlaků 3. Zdroj: Simulace*

Trat' II, sada 3, současnost			Trat' II, sada 3, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	995	0	527	1011	0
12003	1564	0	67005	1404	0
67005	1729	0	12003	1968	0
87007	1967	0	87007	2112	2
Bodové hodnocení I.		2821	Bodové hodnocení I.		2702
Bodové hodnocení II.		2821	Bodové hodnocení II.		2902

Tabulka 39: Hodnocení výsledků simulace tratě II. sada vlaků 4. Zdroj: Simulace

Trať II, sada 4, současnost			Trať II, sada 4, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	1010	0	527	995	0
12003	1579	0	67007	1221	0
67007	1713	1	12003	1813	0
87007	1916	0	87007	2011	2
Bodové hodnocení I.		2770	Bodové hodnocení I.		2350
Bodové hodnocení II.		2870	Bodové hodnocení II.		2550

V traťové konfiguraci s dlouhým úsekem rychlostního omezení podle hodnocení I. vychází lépe varianta navrhovaná. Podle hodnocení II. vychází ve dvou případech nepatrně hůře varianta navrhovaná, viz tabulky 36 a 38. Zhoršení je z důvodu neplánovaného zastavení Mn na trati za Os. Zde by stálo za úvahu v budoucnu přesimulovat odsun Os na konec svazku, zda by nedošlo k vylepšení skóre hodnocení II., ovšem nesmí to být za cenu velkého nárůstu doby jízdy vlaků úsekem.

Trať konfigurace III., přehled hodnocení variant, tabulky 40, 41, 42 a 43.

Tabulka 40: Hodnocení výsledků simulace tratě III. sada vlaků 1. Zdroj: Simulace

Trať III, sada 1, současnost			Trať III, sada 1, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	883	0	527	882	0
9001	1455	0	67005	1267	0
67005	1619	0	9001	1853	0
87007	1805	0	87007	2007	2
Bodové hodnocení I.		2663	Bodové hodnocení I.		2585
Bodové hodnocení II.		2663	Bodové hodnocení II.		2785

Tabulka 41: Hodnocení výsledků simulace tratě III. sada vlaků 2. Zdroj: Simulace

Trať III, sada 2, současnost			Trať III, sada 2, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	881	0	527	791	0
9001	1454	0	67007	1147	0
67007	1601	1	9001	1753	0
87007	1790	0	87007	1908	2
Bodové hodnocení I.		2650	Bodové hodnocení I.		2442
Bodové hodnocení II.		2750	Bodové hodnocení II.		2642

Tabulka 42: Hodnocení výsledků simulace tratě III. sada vlaků 3. Zdroj: Simulace

Trať III, sada 3, současnost			Trať III, sada 3, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	870	0	527	789	0
12003	1458	0	67005	1250	0
67005	1617	0	12003	1843	0
87007	1886	0	87007	1991	2
Bodové hodnocení I.		2768	Bodové hodnocení I.		2683
Bodové hodnocení II.		2768	Bodové hodnocení II.		2883

Tabulka 43: Hodnocení výsledků simulace tratě III. sada vlaků 4. Zdroj: Simulace

Trať III, sada 4, současnost			Trať III, sada 4, návrh		
Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení	Číslo vlaku	Doba jízdy [s]	Neplánov. zastavení
527	868	0	527	868	0
12003	1456	0	67007	1146	0
67007	1603	1	12003	1765	0
87007	1798	0	87007	1910	2
Bodové hodnocení I.		2680	Bodové hodnocení I.		2327
Bodové hodnocení II.		2780	Bodové hodnocení II.		2527

V traťové konfiguraci III. se dvěma kratšími rychlostními omezeními, v hodnocení I. bylo lepší navrhované řešení pořadí jízdy vlaků. V hodnocení II. ve dvou stejných sadách vlaků jako v konfiguraci tratě II. bylo navrhované řešení vyhodnoceno jako nepatrně horší, viz tabulky 40 a 42 , díky zastavení Mn za Os. Doporučil bych v budoucnu také přesimulování situace.

Z výsledků provedených simulací plyne, že hypotézu vyřčenou v kapitole 4.2 se podařilo v rozsahu této práce, potvrdit.

## **6.17 Návrh vlastních opatření**

Z výstupu simulačního programu, který zatím nelze považovat za naprosto dokonalý, je zřejmé, že SŽDC by do budoucna měla přestat lpět na zavedeném pevném pořadí vlaků podle D1 v případě mimořádností. Pro využití kapacity sítě v těchto, ale i jiných případech, například při velkém zpoždění upřednostňovaných vlaků, by bylo vhodné pořadí jízd zpružnit napříč celým spektrem prováděných vlaků. Nelze tvrdit, že navržená pravidla budou účinná vždy a za všech okolností. Nicméně existuje velká pravděpodobnost jejich účinnosti na úsecích železniční sítě, které jsou podobné úseku v této práci simulovanému.

## 7 Závěr

Moderní technika a technologie, jež jsou společnosti k dispozici, nejen usnadňují a zlepšují každodenní život lidí, ale umožňují zásadním způsobem zefektivnit využívání zdrojů, které jsou k dispozici, především zdrojů silně omezených. Mezi tyto zdroje můžeme zařadit i železniční síť, na kterou, jak bylo řečeno v úvodu, nároky stoupají, ale prostředky na její zkapacitnění jsou velmi omezené. V zájmu správce infrastruktury je využít každou příležitost k jejímu efektivnějšímu provozování za použití co nejmenších prostředků.

Na příkladu jednoduchého simulačního programu s mnoha omezeními, který byl vyvinut pro tuto práci, je dobře vidět, jak kapacitu sítě využít za vynaložení poměrně nevelkých prostředků. V případě této práce je to simulace prohození časové polohy dvou vlaků jedoucích úsekem sítě. Je samozřejmé, že na omezeném prostoru této práce nebylo možno odsimulovat veškeré možné kombinace vlaků a rychlostí, který úsek dlouhý pouhých 14000 m poskytuje. I tak by bylo dobré se nad výsledky práce zamyslet.

Pokud by správce infrastruktury nechal na profesionální bázi zpracovat podobný systém, poskytující operativní výstupy pracovníkům DA, přineslo by to efekt jak jemu, tak i dopravcům. Ti by mohli na výstupech také profitovat. Nicméně pro ještě vyšší zefektivnění a zpřesnění výstupů by měli dodávat do systému i svoje vstupní data.

Nyní záleží na odpovědných pracovnících správce infrastruktury, zda bude myšlenka operativní změny časové polohy vlaku dále rozpracována či nikoli.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] Vyhláška číslo 173/1995 Sb. [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <http://zofsmost.mzf.cz/predpisy/1319744937.pdf>
- [2] Předpis SŽDC D1 Návěstní a dopravní předpisy. [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/Portal> .
- [3] Předpis SŽDC D7 o operativním řízení provozu. [online]. [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/Portal>
- [4] Statistické údaje přepravních výkonů železnice. [online]. [cit. 2019-10-01]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/statistiky>
- [5] Dynamika hmotného bodu, [online]. [cit. 2019-10-09]. Dostupné z: <http://www.kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FY11/dyn.hm.b.pdf>
- [6] GVD, SŽDC, poskytnuto FD ČVUT. [cit. 2019-11-20].
- [7] Ing. Vít Janoš, Ph. D.; Ing. Michal Drábek Ph. D.; Ing. Zdeněk Michl; Ing. Milan Kříž; Technologie železniční dopravy. FD ČVUT – materiály ke studiu
- [8] Ing. Milan Kříž, DOPM – úvod do pojmů. FD ČVUT – materiály ke studiu
- [9] Miloslav Pospíšil, Příčiny trhání vlaků. Nadas Praha 1962.
- [10] Prof. Ing. Dr. František Jansa, Vozidla elektrické trakce. Nadas Praha 1983.
- [11] Josef Cibulka a kolektiv, Příručka pro strojvedoucí elektrických lokomotiv. Nadas Praha 1963.
- [12] Atlas lokomotiv. [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: [www.atlaslokomotiv.net](http://www.atlaslokomotiv.net)
- [13] Atlas vozů. [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.atlasvozu.cz/>
- [14] Katalog železničních nákladních vozů ČD Cargo, a.s. [online]. [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: [https://www.cdcargo.cz/cs\\_CZ/katalog-nakladnich-vozu](https://www.cdcargo.cz/cs_CZ/katalog-nakladnich-vozu)
- [15] Koncepce-nakladni-dopravy.pdf. [online]. [cit.2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz>

## **9 Seznam příloh**

**9.1 Výpis zdrojových textů simulátoru**

**9.2 Struktury databázových tabulek**