

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**Metodika budování škálovatelných simulačních  
modelů železničních systémů**

**Autor: Ing. Radek Novotný**

**Školitel: prof. Ing. Antonín Kavička, Ph.D.**

**Disertační práce**

**2020**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 8. 2020

Ing. Radek Novotný

## **Poděkování**

Chtěl bych touto cestou poděkovat svému školiteli prof. Ing. Antonínu Kavičkovi, Ph.D. za vedení během celého mého studia, rady a za věcné připomínky při tvorbě této práce.

## **Anotace**

Pro potřeby zkoumání a optimalizace provozu v rámci komplexních železničních systémů je s výhodou využívána experimentální výzkumná metoda počítačové simulace. V této souvislosti hraje důležitou roli tzv. granularita simulátoru, která určuje míru podrobnosti simulujícího systému na počítači vzhledem k příslušnému objektu zkoumání. Tato disertační práce se zabývá metodikou budování škálovatelných simulačních modelů železniční dopravy, které aplikují na odlišné části simulujícího systému různou míru abstrakce (granularity). Oblasti železniční sítě, kde je zapotřebí detailní zkoumání dopravního provozu, jsou modelovány na mikroskopické úrovni a oblasti, kde postačují pouze hrubé charakteristiky o dopravním proudu, jsou sledovány na makroskopické úrovni. Výsledná metodika disponuje řadou funkcionalit podporujících konstrukci variantních konfigurací škálovatelného simulátoru pro potřeby odlišných scénářů simulačních experimentů.

## **Klíčová slova**

Škálovatelný simulační model, hybridní model, železniční provoz, transformace dopravních proudů

## **Title**

Methodology of building scalable simulation models reflecting railway traffic

## **Annotation**

In order to investigate or to optimize railway traffic within complex railway systems, computer simulation methods are frequently utilized. Relevant simulation models can apply different degree of granularity, which defines the level of details within the computer simulating system with regard to the particular object of investigation. This dissertation focuses on the methodology of building scalable simulation models reflecting railway traffic. Those models apply different level of abstraction (granularity) to diverse parts of a simulating system. The areas of a railway system that are supposed to be studied in detail are typically modelled on a microscopic level. The sections of infrastructure, which require to follow just rough traffic evaluations, are investigated on a macroscopic level. The resulting methodology contains a variety of functionalities supporting the construction of variant configurations related to a scalable simulator of railway traffic for the needs of different simulation scenarios.

## **Keywords**

Scalable simulation model, hybrid model, railway traffic, transformations of traffic flows

## Obsah

Úvod.....	8
Cíl práce .....	9
1 Základní pojmy z oblasti železniční terminologie .....	10
2 Základní pojmy z oblasti modelování a simulace.....	12
2.1 Systém .....	12
2.2 Model.....	12
2.3 Modelování.....	13
2.4 Simulace .....	13
2.5 Škálovatelné simulační modely .....	13
2.6 Verifikace a validace .....	14
2.7 Zkoumání systémů hromadné obsluhy s podporou simulace.....	14
3 Přehled současného stavu v oblasti škálovatelnosti dopravních simulátorů.....	15
3.1 Simulační modely .....	15
3.2 Problém škálovatelnosti ve stávajících simulátorech .....	16
3.3 Škálovatelný simulační model s plynulým přechodem .....	16
3.3.1 Model infrastruktury .....	16
3.3.2 Model provozu .....	17
3.4 Hybridní model.....	18
3.4.1 Model infrastruktury .....	20
3.4.2 Model provozu .....	20
4 Přehled současných simulačních nástrojů železničního provozu .....	22
4.1 OpenTrack .....	22
4.2 Villon.....	23
4.3 RailSys.....	25
4.4 NEMO .....	25
4.5 Další nástroje .....	26
5 Návrh unitárního hybridního simulačního modelu železničního provozu.....	28
6 Návrh hybridního modelu infrastruktury .....	29
6.1 Reprezentace železniční infrastruktury .....	29
6.2 Mikroskopický model infrastruktury.....	31
6.3 Hybridní model infrastruktury.....	36
6.3.1 Algebraická formalizace modelu infrastruktury .....	36
6.3.2 Poznámky k vlastnostem hybridního modelu infrastruktury .....	39
6.3.3 Makro-segmenty infrastruktury.....	41

7	Návrh hybridního modelu provozu .....	47
7.1	Koncept mikroskopického submodelu provozu .....	48
7.2	Koncept makroskopického submodelu provozu.....	48
8	Životní cyklus vlaku v submodelech provozu .....	53
8.1	Mikroskopický submodel provozu .....	53
8.2	Makroskopický submodel provozu .....	54
9	Transformace dopravních proudů .....	57
9.1	Stanovení maximální kapacity makro-segmentu.....	58
9.2	Předběžná rezervace kapacity makro-segmentu.....	61
9.3	Rezervace kapacit v následných submodelech .....	62
9.4	Stanovení očekávané doby pobytu vlaku v makroskopickém submodelu provozu ..	65
9.5	Stanovení dalších parametrů vlaku pro jeho pohyb v následném submodelu.....	68
10	Návrh metodiky ScalRail .....	69
10.1	Fáze A - Konstrukce mikroskopického modelu infrastruktury .....	70
10.2	Fáze B - Konstrukce hybridního modelu infrastruktury.....	71
10.3	Fáze C - Parametrizace mikroskopického submodelu provozu.....	72
10.4	Fáze D - Parametrizace makroskopického submodelu provozu.....	73
10.5	Fáze E - Parametrizace řídicí vrstvy .....	74
10.6	Použití metodiky v simulační studii .....	75
11	Případová studie .....	77
11.1	Základní charakteristiky vybrané oblasti reálné železniční sítě .....	77
11.2	Základní informace o prováděných simulačních experimentech .....	82
11.3	Deterministické simulační experimenty .....	84
11.4	Stochastické simulační experimenty .....	90
11.4.1	Mikroskopický model provozu .....	90
11.4.2	Hybridní model provozu .....	91
12	Závěr.....	98
12.1	Přínosy práce .....	99
12.2	Perspektivy dalšího vývoje.....	99
	Seznam použité literatury .....	101
	Seznam obrázků .....	107
	Seznam tabulek .....	108

## Seznam zkratk

AMI	Agregovaný model infrastruktury
ATC	Automatic Train Control
ATP	Automatic Train Protection
DGN	Desing File Format
DXF	Drawing Interchange File Format
ETCS	European Train Control System
GPS	Globální polohový systém
railML	Railway Markup Language
SWDI	Sum of Weighted Delay Increments
SŽ	Správa železnic
TTP	Tabulka traťových poměrů
XML	Extensible Markup Language

# ERRATUM K DISERTAČNÍ PRÁCI

Ing. Radka Novotného

## Metodika budování škálovatelných simulačních modelů železničních systémů

### Oprava

Správný výpočet koeficientu zrychlení ve vztahu (2) na straně 56:

$$a = \frac{(F_{\bar{v}} + F_0)}{2m}$$



## Úvod

Velké třída systémů v reálném světě, které zahrnují obslužné procesy zaměřené na proudy zákazníků procházející obslužnými zařízeními, od nichž vyžadují obsluhu, se nazývají obslužné systémy nebo systémy hromadné obsluhy. Jako příklady obslužných systémů lze uvést železniční uzly, banky, nemocnice a podobně. Cílem všech systémů hromadné obsluhy je pro danou kapacitu obsluhy zajistit, aby se nevytvářely fronty před obslužnými zařízeními a aby tato obslužná zařízení byla dostatečně vytížena. Při zkoumání a optimalizaci uvedených typů systémů se kromě analytických řešení, která lze využít jen pro ty jednodušší případy, s výhodou využívá experimentální výzkumná metoda počítačové simulace. Ta aplikuje experimentování s modelem daného systému s využitím vhodných programových prostředků. Z dat získaných v průběhu simulačního experimentu lze analyzovat provoz i velmi složitých systémů hromadné obsluhy. V rámci počítačové simulace hraje důležitou roli tzv. *granularita* simulátoru, která určuje úroveň podrobností sledovaných v simulujícím systému. V závislosti na míře podrobnosti, která je požadována pro studium zkoumaného systému, mohou být použity rozdílné simulující systémy (*mikroskopické*, *mezoskopické* nebo *makroskopické*) lišící se různou úrovní detailů, které zahrnují. Problémem tradičních přístupů je aplikace stejné úrovně podrobnosti na celý simulátor, což neumožňuje upravit *granularitu* pouze části simulátoru. V důsledku uplatnění tohoto homogenního přístupu nelze například kombinovat v jednom simulátoru mikroskopickou a makroskopickou úroveň podrobnosti.

V oblasti simulace železniční dopravy je aktuálně často požadováno modelování stále komplexnějších systémů. V rámci příslušných simulujících systémů je proto potřeba věnovat se i možnostem jejich efektivního návrhu a implementace. Tato práce se soustředí na systémy železniční dopravy, při jejichž zkoumání existuje silná motivace pro využívání nových metodik budování škálovatelných simulujících systémů odrážejících železniční provoz. Tyto metodiky, respektive přístupy umožní kombinovat a propojovat různé subsystémy infrastruktury, které uplatňují odlišné úrovně podrobnosti, na nichž se aplikují příslušné subsystémy provozu vybudované na odlišných principech. V rámci simulačních experimentů je pak například možné se zaměřit na detailní zkoumání pouze úzkých provozních míst zkoumaných systémů a pro ostatní oblasti aplikovat pouze hrubší zkoumání.

## **Cíl práce**

Hlavním cílem práce byl návrh metodiky budování škálovatelných simulačních modelů železničních systémů a její následné ověření. V této souvislosti se předpokládalo využití hybridního simulačního modelu železničního provozu, který kombinuje a propojuje mikroskopické a makroskopické součásti. Pro ověření metodiky bylo požadováno použití vhodného softwarového demonstrátoru.

## 1 Základní pojmy z oblasti železniční terminologie

Z důvodu zaměření práce na železniční systémy je tato kapitola věnována přehledu příslušných základních pojmů, které se v práci nejčastěji využívají. Uvedené definice a pojmy vychází z publikace [23].

Souhrn všech železničních dopravních cest (kolejí) na určitém území se nazývá *železniční síť*. Železniční síť se dělí do dílčích částí tzv. *železničních tratí*, které jsou zpravidla ohraničeny *železničními stanicemi* (případně *železničními uzly*). Železniční síť se dále dělí do *traťových úseků*, které jsou ohraničeny úsekovými stanicemi. Traťový úsek je členěn na menší části pomocí mezilehlých stanic. Tyto části jsou označeny jako *mezistaniční úseky*. V některých částech železniční sítě je mezistaniční úsek nejmenší částí nazývanou jako *mezistaniční oddíl*. V některých jiných částech železniční sítě však dochází k jejich dalšímu dělení do tzv. *prostorových oddílů* (zejména z důvodu kapacit). Tento prostorový oddíl poté tvoří nejmenší element v této oblasti železniční sítě.

Existují místa na železniční síti (*dopravny*), která slouží pro řízení sledů vlaků. Část železniční sítě mezi dopravami se někdy také nazývá *širá trať*. Dopravny se dělí na *dopravny s kolejovým rozvětvením* a na *dopravny bez kolejového rozvětvení*. Mezi dopravny s kolejovým rozvětvením lze zařadit *železniční stanice*. Železniční stanice se obecně třídí dle:

- povahy přepravního provozu (osobní, nákladní, smíšený a podobně),
- povahy dopravního provozu železnic (úsekové, mezilehlé, seřaďovací a podobně) a
- dle dalších hledisek (výchozí, mezilehlé, odbočné a podobně).

*Obvody železničních stanic* poté vymezují oblasti mezi přílehlými vjezdovými návěstidly (případně zarážedly slepých kolejí). Seskupení několika železničních stanic a přílehlých tratí na vybraném území železniční sítě (například sídelních a průmyslových aglomerací) se nazývá *železniční uzel*.

Pojem *výhybka* označuje zařízení, které umožňuje přechod železničních vozidel z jedné koleje na druhou bez přerušení jejich jízdy. Výhybky se dělí dle konstrukce na *jednoduché*, *obloukové*, *dvojitě* a *křížovatkové*. *Kolejová křížovatka* označuje takové zařízení, které slouží pro křížení kolejí, aniž by byl možný vzájemný přejezd z jedné koleje na druhou.

*Návěstidlo* je zařízení, prostřednictvím kterého se dávají informace (návěsti) strojvedoucímu. *Předvěst* je nepřenositelnou návěstí, která je umístěna na zábrzdnu vzdálenost před hlavním návěstidlem. Pod pojmem *zábrzdna vzdálenost* se rozumí délka úseku trati (dle druhu tratě a nejvyšší dovolené rychlosti) před místem, kde je dávána návěst *stůj*.

*Zabezpečovací zařízení* představuje technické prostředky (a vazby mezi nimi), které slouží k zajištění bezpečné jízdy vlaků. *Staniční zabezpečovací zařízení* slouží k zajištění jízd vlaků ve stanicích, jakož i k zajištění jízd posunujících dílů. Podle konstrukce a vzájemných závislostí ovládacích prvků se staniční zabezpečovací zařízení dále dělí například na

*mechanická, elektrická, elektronická* a podobně. Mezi elektrická zabezpečovací zařízení lze zařadit i tzv. *izolovaný (kolejový) obvod*, který slouží k detekci obsazení daného segmentu kolejiště. *Traťové zabezpečovací zařízení* slouží k zajištění jízdy vlaků mezi dopravnami (na širé trati). Traťová zabezpečovací zařízení jsou založená například na telefonickém dorozumívání (například hláska), poloautomatických zařízeních (například hradlový nebo reléový poloautomatický blok) nebo na zařízeních, kde dochází ke zprostředkování závislosti mezi dopravnami automaticky na základě aktuální jízdy vlaku (například automatický blok a automatické hradlo).

Pro zajištění bezpečné jízdy vlaků se předpokládá také dodržování provozních intervalů a následných mezidobí. *Provozní interval* vyjadřuje nejkratší dobu potřebnou pro zajištění bezpečné a plynulé jízdy vlaků v místech jejich možného vzájemného ohrožení. Provozní intervaly se dělí se na *staniční* (například *nástupištní*) a *traťové* (definující pravidla například pro následné a protisměrné jízdy vlaků). Na základě provozních intervalů se stanovuje i tzv. *následné mezidobí*, které určuje nejkratší přípustnou dobu mezi okamžikem odjezdu (průjezdu) daného vlaku a okamžikem odjezdu (průjezdu) následného vlaku ze stejné dopravní na stejnou traťovou kolej.

Železniční *kolejová vozidla* jsou mobilní částí technické základny železnic. Železniční kolejové vozidlo je definováno jako drážní vozidlo nesené a vedené při svém pohybu železniční kolejí. Kolejová vozidla vybavená agregátem na vývin hnací síly se nazývají *hnací vozidla*. Naproti tomu existují vozidla *tažená* (připojná), která slouží k přepravě osob, zboží a podobně.

## 2 Základní pojmy z oblasti modelování a simulace

Z důvodu zaměření na počítačovou simulaci je nezbytné stručně popsat základní pojmy používané v oblasti modelování a simulací, které jsou pro popis metodiky využity i v této práci. Uvedené pojmy vychází zejména z publikace [22].

### 2.1 Systém

V rámci modelování a simulace se studují možné varianty nějakého objektu z hmotného světa, který může existovat nebo může být dokonce jeho existence neznámá. Pro popis takového objektu se využívá tzv. *abstrakce*, při níž se některé reálné aspekty tohoto objektu zanedbávají (například z důvodu jeho komplexnosti). Pojem *systém* tedy vyjadřuje abstrakci, která je aplikována na daný objekt zkoumání.

Pokud se v rámci systému význam času zanedbává, pak se jedná o *statický systém*. Opakem je *dynamický systém*, ve kterém je význam času zahrnut.

Dynamický systém existuje v množině okamžiků, která se nazývá (*časovou*) *existenci systému*. Dynamický systém se v každém okamžiku své existence nachází v určitém stavu.

V modelování a simulaci je systém složen z prvků mající své vlastnosti (atributy). Počet prvků se může během existence systému měnit. Jako *permanentní prvky* se označují ty, které jsou v dynamickém systému během celé jeho existence. Opakem jsou tzv. *temporární prvky*, které do dynamického systému v průběhu jeho existence vstupují (nebo v něm vznikají) nebo systém opouštějí (zanikají).

Pojem *stav* dynamického systému v čase  $t$  je dán prvky, které jsou v čase  $t$  v tomto systému přítomny, dále hodnotami jejich atributů v tomto čase a nakonec i relacemi mezi těmito prvky.

### 2.2 Model

Termín *model* (v oblasti modelování a simulace) je použit pro analogii mezi dvěma systémy. Vztah obou systémů, *modelovaného* a *modelujícího*, je dán tím, že každému prvku  $P$  modelovaného systému je přiřazen prvek  $Q$  modelujícího systému, každému atributu  $g$  prvku  $P$  je přiřazen atribut  $h$  prvku  $Q$  a pro hodnoty atributů  $g$  a  $h$  je dána nějaká relace.

Pokud jsou modelovaný i modelující systém statické, je daný model označován jako *statický model*. V rámci simulace se však uplatní pouze tzv. *simulační modely*. Jedná se modely, které splňují následující požadavky:

1. Jejich modelující i modelované systémy jsou dynamické systémy.
2. Existuje zobrazení  $\tau$  existence modelovaného systému do existence modelujícího systému; je-li tedy  $t_1$  okamžik, v němž existuje modelovaný systém  $M_1$ , je mu přiřazen okamžik  $\tau(t_1) = t_2$ , v němž existuje modelující systém  $M_2$ , a tak je zobrazením  $\tau$  přiřazen i stavu  $S_1(t_1) = \sigma_1$  systému  $M_1$  stav  $S_2(t_2) = \sigma_2$  systému  $M_2$ .

3. Mezi stavy  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  jsou splněny požadavky na vztahy mezi příslušnými prvky a jejich atributy.
4. Zobrazení  $\tau$  je neklesající. Pokud nastane stav  $s$  modelovaného systému před stavem  $s^*$  téhož systému, pak stav  $\bar{s}$  (který v modelujícím systému odráží stav  $s$ ) nastane před stavem  $\bar{s}^*$  (který odráží stav  $s^*$ ), nebo mohou oba stavy nastat v modelujícím systému současně (totiž v případě, že modelující systém není na takové úrovni rozlišení, aby dokázal zobrazit všechny detaily v modelovaném systému), nikdy však nemůže být časové pořadí stavů v modelovaném systému a jim odpovídajících stavů v modelujícím systému přehozeno.

Model tedy představuje složitou strukturu, která váže dva systémy, jejich prvky a atributy. V případě simulačních modelů i existence obou systémů. V praxi se však využívá ne zcela přesná interpretace, že slovem *model* se rozumí modelující systém. Pro termín modelovaný systém se využívá termín *originál*.

V případě simulačních modelů jsou vázány systémy *simulovaný* a *simulující*. Termín simulující systém je někdy (nepřesně) nahrazován termínem *simulační model* respektive *simulátor*.

### 2.3 Modelování

Pojem modelování ve smyslu výzkumné techniky je náhrada zkoumaného systému jeho *modelujícím systémem* (tj. *modelem*). Pomocí experimentů s modelem, které mohou být v reálném světě neproveditelné, lze získat informace o původním zkoumaném systému.

### 2.4 Simulace

Pojem *simulace* lze chápat jako výzkumnou techniku respektive proces, jehož účelem je náhrada zkoumaného dynamického systému jeho *simulujícím systémem*, jinými slovy *simulátorem*. Pomocí prováděných experimentů se simulátorem lze získat informace o původním zkoumaném systému.

### 2.5 Škálovatelné simulační modely

Z hlediska studia objektu zkoumání prostřednictvím simulujícího systému nemusí být některé reálné aspekty tohoto objektu důležité nebo je jejich zahrnutí časově náročné. V tomto kontextu se jedná o uplatnění určité míry abstrakce, která je aplikována při vytváření simulačního modelu (tzv. *rozlišovací úroveň simulačního modelu*). Z toho důvodu se simulační modely mohou klasifikovat dle aplikované úrovně podrobnosti jako *mikroskopické*, *mezoskopické* nebo *makroskopické* [3]. Tato aplikovaná úroveň podrobnosti je typicky uplatněna v rámci celého simulátoru a je závislá na povaze cíle zkoumání.

V rámci počítačových simulací se uplatňují i simulační modely, které se nazývají *škálovatelné*. Tento pojem má v oboru počítačová simulace několik interpretací. Škálovatelné simulační modely mohou:

- dekomponovat simulátor do částí uplatňujících různou míru abstrakce [2, 13],
- uplatňovat dynamické změny míry podrobnosti celého simulátoru v průběhu simulačního experimentu [3, 4],
- propojovat odlišné navzájem kooperující systémy v rámci simulace [8],
- aplikovat simulační architekturu využívající například cloudové prostředí [60] a podobně.

## 2.6 Verifikace a validace

V souvislosti s počítačovou simulací se využívají pojmy verifikace a validace. *Verifikace* je proces, při kterém se prověřuje logická správnost činnosti simulujícího systému. V rámci verifikace se ověřuje pravdivost hypotéz o zkoumaném systému a tedy, že představa o fungování zkoumaného systému byla správně pochopena a aplikována.

Pod pojmem *validace* simulujícího systému se rozumí proces, v jehož rámci se prověřuje, zda je chování tohoto systému dostatečně věrné při srovnání s realitou nebo s příslušným jiným již validovaným (počítačovým) simulátorem.

## 2.7 Zkoumání systémů hromadné obsluhy s podporou simulace

Obecně lze železniční systémy zahrnout do velké třídy systémů, které lze označit jako obslužné systémy či systémy hromadné obsluhy [61, 62, 64]. Z pohledu teorie hromadné obsluhy představují (například železniční stanice anebo širé tratě) komplexní systémy, ve kterých existují objekty obsluhy (zákazníci) a obslužné prvky (obslužné linky). Zákazníci jsou objekty vyžadující obsluhu a z hlediska železniční dopravy se může jednat o vlaky, posunující díly, hnací vozidla a podobně. Obslužné linky naopak obsluhu realizují a z hlediska železniční dopravy se může jednat o koleje, pracovníky, lokomotivy a podobně. Obecně je proces obsluhy množina vzájemně interagujících činností, které tak tvoří hierarchickou strukturu. Železniční systém lze strukturovat na:

- *pevný podsystem* (například koleje, výhybky a podobně),
- *pohyblivý podsystem* (například pracovní čety, posunovací lokomotivy a podobně),
- *řídící podsystem* (například systémy pro podporu rozhodování a podobně).

V případě komplexních systémů hromadné obsluhy (například železničních systémů) je využití exaktních matematických metod značně omezené. Hlavním problémem je například častá změna parametrů v případě již vytvořeného matematického modelu systému, kdy se musí tento model pracně přepracovat, a tedy i experimentování s tímto modelem je velice problematické. V současné době se tedy pro účely zkoumání komplexních systémů hromadné obsluhy (tedy i těch železničních) často používá výzkumná metoda počítačové simulace. Při použití této experimentální metody sice nedochází vždy k nalezení optimálního řešení, ale prostřednictvím vhodně stanovené série simulačních experimentů lze získat alespoň suboptimální řešení zkoumaných úloh.

### 3 Přehled současného stavu v oblasti škálovatelnosti dopravních simulátorů

Budování škálovatelných simulačních modelů je potenciálně využitelné při modelování rozsáhlých dopravních systémů, mezi které lze zahrnout například systémy železničního provozu, systémy silničního provozu či systémy pěšího provozu chodců v dynamickém prostředí. Tato práce se úzce zaměřuje pouze na systémy železniční. V následujících kapitolách budou představeny možné způsoby výstavby škálovatelného simulačního modelu železničního provozu, a to dle dostupných publikací.

#### 3.1 Simulační modely

V závislosti na míře podrobnosti, která je v rámci zkoumání železničního provozu požadována, mohou být použity rozdílné simulační modely lišící se různou úrovní sledovaných detailů, a tedy odlišnými požadavky na přesnost. S ohledem na konkrétní cíl zkoumání (například sledování propustnosti či vlivů zpoždění) je důležité vhodně zvolit míru podrobnosti jednotlivých podsystémů simulujícího systému [3, 22, 27].

Obecně jsou pro potřeby dopravních simulací modely klasifikovány dle aplikované úrovně podrobnosti jako mikroskopické, mezoskopické a makroskopické. *Mikroskopické* simulační modely jsou charakteristické zkoumáním s vysokou mírou rozlišení. Sledují se jednotlivé mobilní entity (kolejová vozidla) a jejich interakce. Z těchto důvodů je nutné do simulačního modelu zahrnout podrobné informace o jednotlivých podsystémech (pevný podsystém – typicky tvořený infrastrukturou, pohyblivý podsystém – sestávající z mobilních objektů a řídicí podsystém – specifikující technologické procesy a podobně). Jejich použití je vhodné při zkoumání méně rozsáhlých segmentů železniční sítě (například provozní prověření železniční stanice při změně její infrastruktury nebo grafikonu vlakové dopravy či změně obslužných technologií a podobně) a to zejména díky vysokým požadavkům na přesnost.

Zatímco pro uvedené typy šetření je typické podrobné sledování interakcí jednotlivých mobilních entit, tak pro posuzování například kapacit tratí či stanic může postačovat sledování pouze hrubých charakteristik dopravních proudů (nemusí být tedy sledována jednotlivá kolejová vozidla). Pro tento účel šetření se s výhodou využívají *makroskopické* simulační modely, které na úkor přesnosti umožňují jednotlivé podsystémy zjednodušit a provádět tak simulační experimenty i nad rozsáhlými segmenty železniční sítě. Existuje však kompromis v podobě *mezoskopických* simulačních modelů, které se snaží dosáhnout vyváženosti mezi přesností a výpočetní náročností.

V současné době jsou často kladeny vysoké požadavky na detailní dopravní simulace, a hlavně požadují modelování rozsáhlých dopravních sítí, které samozřejmě zahrnují problémy spojené s vysokou výpočetní náročností. V rámci simulačních experimentů, které se zaměřují převážně na provozní prověření pouze části dopravní sítě, nemusí být okolní oblasti z pohledu experimentátora nosné, a proto není nutné provádět v těchto částech dopravní sítě mikroskopickou simulaci provozu. Z těchto důvodů existuje myšlenka použití takového



simulačního modelu (*škálovatelného modelu*), který by umožnil modelovat různé oblasti dopravní sítě s uplatněním různé míry abstrakce.

### 3.2 Problém škálovatelnosti ve stávajících simulátorech

Jak již bylo uvedeno, z pohledu současných přístupů se nejvíce využívají simulační modely aplikující jednotnou úroveň podrobnosti v rámci celého železničního simulujícího systému. Avšak, například v simulačním nástroji *Villon* [15] nebo *OpenTrack* [17] lze jistou škálovatelnost docílit vhodnou *změnou podrobnosti části vstupních dat*.

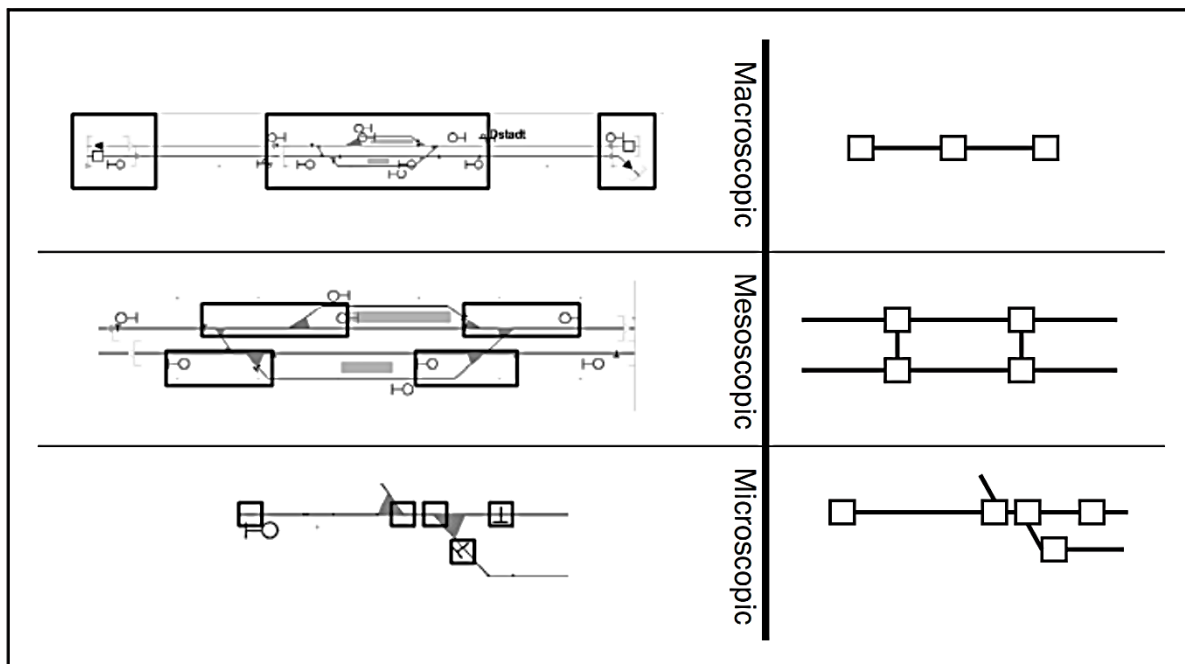
Jako příklad lze uvést hraniční železniční stanice v rámci rozsáhlejší oblasti železniční sítě, z nichž jsou vlaky pouze vypravovány k primárně zkoumanému železničnímu uzlu, a tedy nejsou z hlediska zkoumání dané simulační studie nosné (v těchto stanicích je tedy sledována pouze zjednodušená infrastruktura). Takovéto hraniční stanice tedy mohou být modelovány s menší přesností. Je nutné však zdůraznit, že zmíněný přístup je založen pouze na změně podrobnosti části simulujícího systému (zejména jeho infrastruktury), avšak v rámci celého simulátoru je uplatňována jednotná míra abstrakce vzhledem k charakteru simulace provozu.

### 3.3 Škálovatelný simulační model s plynulým přechodem

Pro potřeby budování škálovatelných simulačních modelů železničního provozu existují různé přístupy k jejich výstavbě. V rámci publikací [3, 4] je představen koncept škálovatelného simulačního modelu, který disponuje možností změny úrovně podrobnosti dynamicky v průběhu simulačního experimentu zaměřeného na provoz na celé silniční síti (*škálovatelný simulační model s plynulým přechodem*). Změnu úrovně podrobnosti z mikroskopické na mezoskopickou (*bottom-up*), anebo naopak (*top-down*) lze aplikovat například pouhou provedenou změnou příslušného grafického přiblížení. Grafické přiblížení (zoom) je propojen se stavovým prostorem a mění se hodnotou zoomu, tak mění i výpočty v datové vrstvě.

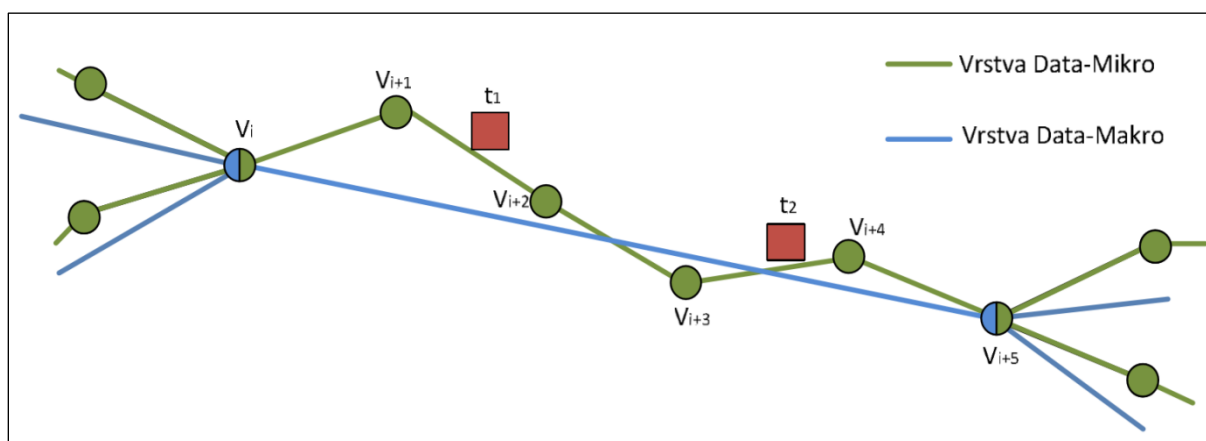
#### 3.3.1 Model infrastruktury

Pro použití výše uvedeného konceptu škálovatelného simulačního modelu železničního provozu, je potřeba vyřešit grafickou vizualizaci infrastruktury v různých úrovních přiblížení, ale také zejména zachování konzistence dynamiky provozu vzhledem k různým úrovním abstrakce. Pokud by se uvažoval model železniční sítě reprezentovaný datovou strukturou neorientovaný graf [24], lze k různým grafickým vizualizacím využít například přístup z [1]. Aplikaci různé míry abstrakce (nad odlišnými modely infrastruktury) lze dosáhnout prostřednictvím agregace modelu kolejiště (*Obrázek 1*), kde každý vrchol respektive hrana grafu (reprezentující vybranou úroveň podrobnosti) zapouzdřuje odlišně velkou oblast (respektive jiné objekty) původního modelu kolejiště.



Obrázek 1- Vizualizace infrastruktury v různých úrovních podrobnosti. Zdroj:[1]

Odlisný způsob, publikovaný v práci [14], je využití mikroskopického modelu kolejí ke generování tzv. super hrubé topologie železniční sítě, která představuje makroskopický model infrastruktury. Makroskopický model vzniká nahrazováním posloupností hran (v mikroskopickém modelu) v úsecích, kde nedochází ke křížení tratí nebo sbíhání či rozbíhání tratí do jedné, resp. více tratí. Například detailní širou trať mezi stanicemi modelovanou několika dílčími hranami (kolejovými úseky) na mikroskopické úrovni nahrazuje v makroskopickém modelu jedna hrana (Obrázek 2).



Obrázek 2 - Super hrubá topologie železniční sítě. Zdroj:[14]

### 3.3.2 Model provozu

Pro různou úroveň granularity (uplatňovanou v různých částech simulujícího systému) se nejen aplikuje různá grafická vizualizace infrastruktury, ale zejména odlišné modely provozu. Ty mohou být založené jednak na výpočtu dynamiky jízdy jednotlivých vlaků, jednak na

střední rychlosti a podobně. Obecně je tedy zapotřebí zvládnout transformaci dopravních toků mezi odlišnými součástmi simulujícího systému.

Pro potřeby makroskopické simulace lze například využít agregované informace (atributy) o infrastruktuře/provozu, které aplikují vyšší míru abstrakce. Jedná se například o počet vlaků, který projel danou železniční stanicí. Výše uvedené využití agregovaných atributů pro potřeby makroskopické simulace je spojeno s jejich odvozením (například z mikroskopického modelu), které nemusí být vždy jednoznačné. Například pro stanovení maximální povolené rychlosti na určitém segmentu tratě se může brát v úvahu nejnížší přípustná maximální rychlost definovaná na příslušných mikroskopických segmentech, nebo rychlost průměrná a podobně. V opačném případě, kdy se musí hodnoty atributů odvodit z úrovně s vyšší mírou abstrakce (například z makroskopického modelu) je potřeba některé podrobné informace odhadnout a extrapolovat z agregovaných údajů. To vede k získání modelu provozu s omezenou přesností. Hlavní problém je, že i když se touto problematikou zabývá řada autorů [7, 12, 14], dosud v oblasti dopravních simulací neexistuje jednotný přístup, který by řešil konzistenci dynamiky provozu vzhledem k různým modelům provozu v rámci celého simulátoru.

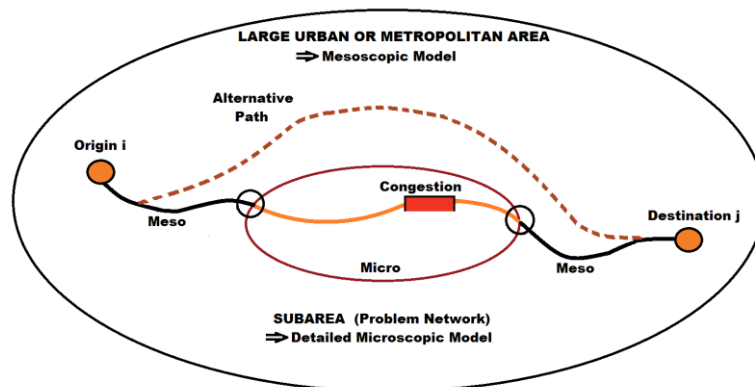
Pro potřeby dynamické změny úrovně podrobnosti simulace provozu (za běhu simulačního výpočtu) lze okrajově využít přístup založený na paralelním provádění například mikroskopické i makroskopické simulace (celého zkoumaného systému) - z pohledu experimentátora bude docházet jen k jejich přepínání. Značnou nevýhodou je však výpočetní náročnost, kterou lze zavedením škálovatelných simulačních modelů snížit [3, 11].

### 3.4 Hybridní model

Simulační model, který se v současné době nejvíce využívá k napodobení škálovatelného simulačního modelu, je tzv. *hybridní model*. Základní myšlenka hybridního modelu [2, 13] je založená na kombinaci submodelů s různou mírou podrobnosti v rámci jednoho simulátoru, které se zpravidla vytváří staticky před zahájením simulace. V rámci simulačního experimentu, prováděného nad hybridním modelem, se lze například zaměřit na detailní zkoumání pouze úzkých provozních míst a v okolních oblastech si vystačit pouze s hrubými provozními charakteristikami. Takto představený hybridní model, a to konkrétně pro simulaci železničního provozu je publikován a rozvíjen celou řadou dalších autorů [6, 18, 19].

Současná řešení hybridního modelu jsou charakteristická využitím *kooperace několika simulačních nástrojů* [3, 8]. Obecně se tyto nástroje rozdělují podle detailů simulačních modelů, které kombinují. Kombinace odlišných nástrojů se může používat pro simulaci provozu v odlišných oblastech zkoumaného systému s různou rozlišovací úrovní. Možným přístupem je použití mikroskopického simulátoru pro modelování oblastí dopravní sítě s vysokým významem. Ostatní oblasti jsou sledovány prostřednictvím makroskopické simulace (*Obrázek 3*). Zkoumaný systém je tedy dekomponován na podsystemy, pro něž je uplatněna odlišná míra abstrakce a jejich provoz je simulován odlišnými simulačními nástroji. Tak se získají detailní informace o provozu v podsystemech s vysokým zájmem, aniž by se muselo využít mikroskopické simulace pro celou dopravní síť. Nevýhodou může být

množství informací o jednotlivých podsystémech, které mohou být v různých simulátorech odlišné.



Obrázek 3 - Kombinace simulačních nástrojů. Zdroj:[8]

Obecně se většina dostupných publikovaných řešení týká převážně kombinací simulačních nástrojů zaměřených na silniční provoz [3]. Mezi zástupce, které kombinují mikroskopické dopravní simulační modely s těmi mezoskopickými jsou:

- Paramics a Dynasmart [40, 41],
- Metropolis a MITSIMLab [42].

Typickým příkladem je však kombinace mikroskopických a makroskopických simulačních nástrojů:

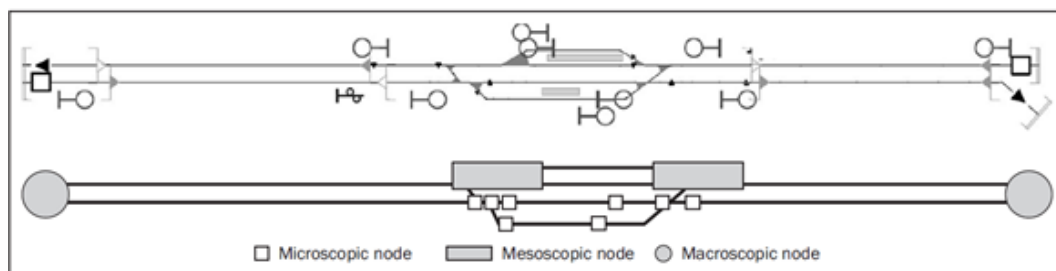
- Aimsun/2 a Emme/2 [43, 44],
- Pelops a Simone [46],
- Micro-Macro Link [3],
- SmartCAP a SmartAHS [47],
- Visum a Vissim [45].

Uvedeným přístupem se zabývá i řada autorů zaměřených na zkoumání železničního provozu, kde stojí za zmínku převážně publikace [6]. Autoři zkoumají takové kombinované využití simulačních nástrojů, kde každý z nástrojů slouží k řešení svých dílčích úloh nad celou oblastí železniční sítě. Základem je kooperativní režim mikroskopického simulátoru *RailSys* [16] a makroskopického simulátoru *NEMO*. *RailSys* obsahuje podrobné informace o jednotlivých podsystémech a provádí detailní simulaci dynamiky pohybu vlaků a s tím spojená šetření. Výsledky a například agregovaný model infrastruktury ze simulátoru *RailSys* jsou následně využívány pro posuzování hrubších provozních charakteristik v simulátoru *NEMO* [6, 28]. Výhodou této spolupráce je redukce vstupních dat jen na potřeby mikroskopického simulačního modelu a zejména obdržení podrobnější výsledků o právě zkoumaném železničním provozu. Například v článku [12] autor demonstruje techniky vytvoření makroskopického modelu kolejiště (z komplexního mikroskopického modelu infrastruktury za použití různých agregačních technik), který lze zároveň jednoduše transformovat nazpět.

Použití kombinace odlišných simulačních nástrojů je však prakticky velice nevhodné pro uživatele (designéry dopravních simulací), a proto existuje potřeba navrhnout metodiku budování hybridních modelů v rámci jednoho uceleného nástroje. Takový hybridní simulační model však zahrnuje problémy týkající se reprezentace dopravní sítě v rámci odlišných úrovní podrobnosti a samotné transformace dynamických informací o provozu (popřípadě o jednotlivých dopravních elementech) mezi submodely sledujícími různou míru detailů. Hybridní model je převážně používán pro simulace silničního provozu [3, 4, 8, 9, 10, 11], avšak existuje i několik autorů zabývajících se přínosy a zejména výhodami použití i v rámci simulačních modelů železničního provozu. Jedná se především o publikace [18, 19, 21].

### 3.4.1 Model infrastruktury

Při budování hybridního modelu infrastruktury lze vycházet z reálných podkladových dat potřebných pro mikroskopický model kolejiště a definovat v nich submodely s nižší mírou podrobnosti (makroskopické, mezoskopické) [1, 2]. Definice těchto submodelů může vycházet z předem stanovených objektů v mikroskopickém modelu kolejiště (*Obrázek 4*) nebo lze tyto submodely definovat libovolně. Jako odlišné submodely si lze typicky představit železniční stanici, která je v mikroskopickém modelu kolejiště reprezentována se všemi elementárními objekty (koleje, nástupiště, návěstidla, výhybky a podobně), ale v rámci makroskopického modelu je reprezentována jediným objektem (uzlem). Odlišným přístupem je budování hybridního modelu infrastruktury, pokud se disponuje pouze daty, která popisují makroskopický model infrastruktury, to znamená model s nižší mírou podrobnosti. Jinými slovy je zapotřebí komplikované odvozování chybějících informací pro modely s vyšší úrovní detailů. I v tomto případě lze využít logických spojení mezi modely s různými detaily vycházejícími ze znalosti dopravní infrastruktury a dopravního provozu a následně potřebný model kolejiště automaticky vygenerovat, samozřejmě s omezenou přesností, tak jak je uvedeno například v publikaci [2].



Obrázek 4 - Příklad hybridního modelu železniční infrastruktury. Zdroj:[1]

### 3.4.2 Model provozu

Problém hybridních simulačních modelů není spojen jen s reprezentací různých submodelů infrastruktury, ale i s příslušnými modely provozu v těchto odlišných submodelech. V rámci železničního provozu jsou sledovány charakteristiky jednotlivých vlaků, jako je *rychlost*, *zrychlení*, *intervaly mezi vlaky* a podobně, které musejí být na rozhraní odlišných submodelů provozu jednoznačně určeny z důvodu zachování konzistence dynamiky jejich jízdy, a tedy realistické simulace celkového železničního provozu. Je samozřejmě důležité vhodné umístění hranic mezi těmito submodely, a to vzhledem k dopravně významným místům jako jsou například výhybky, kolejové křižovatky, kolejová zhlaví a podobně. Tomuto typu

problému se však věnuje omezená řada autorů [3, 9] a konkrétně pak znovu pouze v oblasti silničního provozu, jehož povaha se od železničního provozu liší.

## 4 Přehled současných simulačních nástrojů železničního provozu

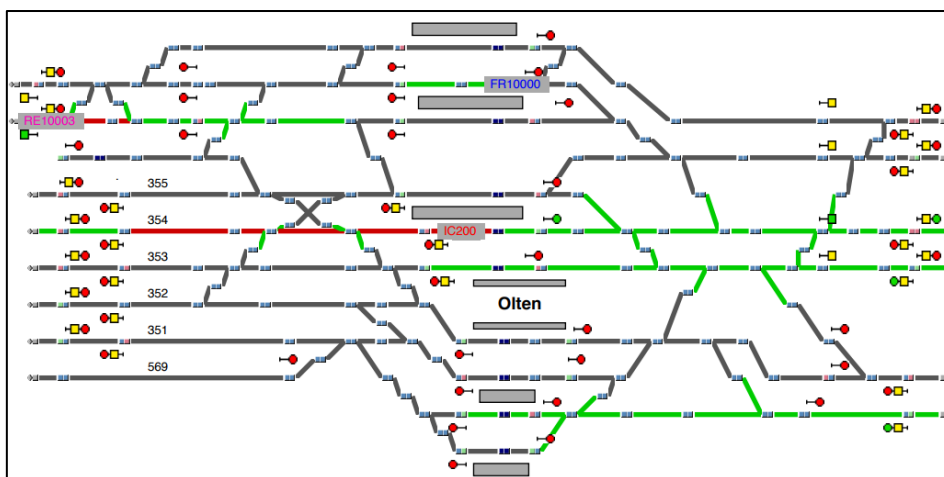
Pro potřeby budování škálovatelných simulačních modelů železničního provozu je potřeba mít k dispozici vhodný simulační nástroj. Bohužel v této oblasti doposud neexistuje simulátor, který by umožňoval kombinovat a propojovat různé modely infrastruktury (vystavěné na odlišných úrovních podrobnosti), nad nimiž jsou uplatněny odlišné koncepty simulace železničního provozu.

Tato kapitola stručně shrnuje informace o několika v současnosti nejvíce využívaných simulačních nástrojích (zaměřených na simulace železničního provozu), o jejich vlastnostech a přístupech. Poznání stávajících nástrojů bylo důležité pro vytvoření vlastní koncepce nástroje, který umožňuje výstavbu škálovatelných simulujících systémů a provádění příslušných simulačních experimentů.

### 4.1 OpenTrack

*OpenTrack* [17, 53] je mikroskopický simulační nástroj specializovaný na simulace provozu drážních systémů. Zaměřuje se na analyzování provozu systémů vysokorychlostní, dálkové, příměstské, nákladní a důlní železniční dopravy, podzemní dráhy, tramvajové dopravy atd. Nástroj umožňuje provádět různé úkoly jako je konstrukce jízdních řádů, analýza a návrh zabezpečovacích systémů (například systém pevných, krátkých a pohyblivých oddílů, liniových vlakových zabezpečovačů, ATP, ETCS a podobně), analýzu kapacit tratí a stanic, analýzu robustnosti jízdních řádů, analýzu vlivu poruch a zpoždění na železniční provoz.

Pro popis kolejiště se využívá schématické vizualizace, která umožňuje částečně urychlit přípravu modelu infrastruktury (*Obrázek 5*). Pro popis železniční sítě využívá graf aplikující tzv. dvojvrcholy [38], který mu dovoluje vytvářet a spravovat objekty na hranách a vrcholech, jakož i modelovat návěstidla, výhybky, stanice a vlakové cesty. Zároveň podporuje editaci jednotlivých atributů příslušných objektů (délka, sklon, maximální rychlost pro různé kategorie vlaků a mnoho dalšího). *OpenTrack*, jakožto jeden z mála simulačních nástrojů železničního provozu, podporuje poslední verzi standardu *railML* (podporujícího interoperabilitu železniční infrastruktury), jako jednotného předpisu pro ukládání a přenos dat železniční infrastruktury.



Obrázek 5 - Model infrastruktury v nástroji OpenTrack. Zdroj:[53]

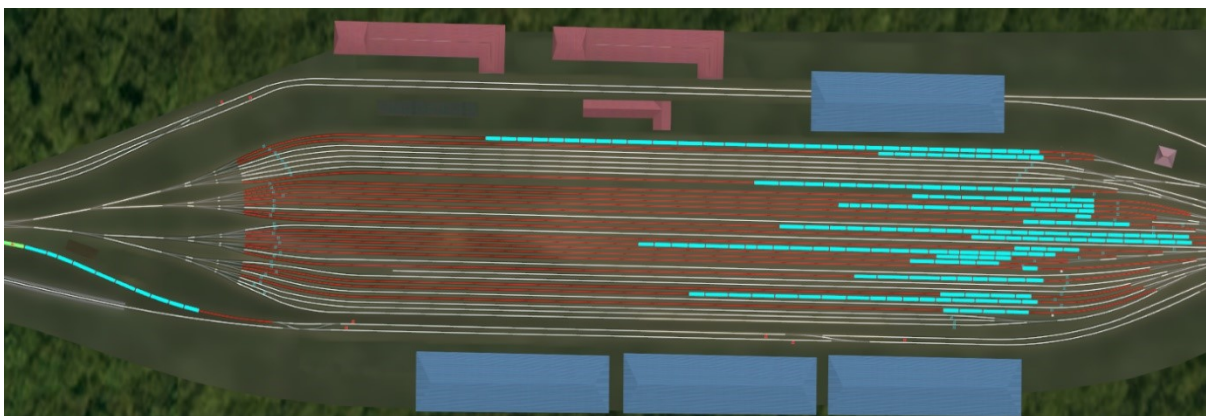
Během simulace železničního provozu se vlaky snaží dodržovat určený jízdní řád. Pro výpočet dynamiky pohybu vlaků se využívají diferenciální rovnice pro počítání rychlosti a polohy. Do výpočtů vstupují nejen informace o infrastruktuře, ale také technické vlastnosti každé vlakové soupravy včetně trakční charakteristiky, délky, hmotnosti, součinitele adheze a trakční soustavy lokomotivy. Pohyb vlaku po infrastruktuře uvažuje činnost zabezpečovacích zařízení, obsazenost kolejí a omezující návěsti. *OpenTrack* pomocí náhodného generátoru vytváří různá vstupní zpoždění vlaků a zpoždění ve stanicích.

Po ukončení simulace nástroj nabízí celou řadu možností hodnocení simulačních experimentů dle výstupních dat, které jsou dostupné v mnoha formátech (obsazenost kolejí, časy příjezdů, časy odjezdů a doby pobytů vlaků ve stanicích, nákrešný jízdní řád, tachogram atd.).

## 4.2 Villon

*Villon* [15, 30, 31] je specializovaný softwarový produkt (mikroskopický simulační nástroj), který umožňuje vytvářet a experimentovat se simulačními modely různých dopravních logistických terminálů (zejména dopravních uzlů se železniční infrastrukturou). V simulačním nástroji je možné vytvořit podrobné simulační modely (například železniční stanice, továrny, depa, letiště a podobně), definovat simulační scénáře, provádět experimenty a vyhodnotit výsledky simulačních běhů v jednom integrovaném prostředí. Tento nástroj nabízí detailní modelování a vizualizaci infrastruktury, podrobné modelování mobilních zdrojů, ale i možnosti modelování například železniční a silniční dopravy v jednom modelu. Na druhou stranu, *Villon* díky svému zaměření postrádá podporu pro modelování extrémně rozsáhlých dopravních sítí.





Obrázek 6 - Model infrastruktury v nástroji Villon. Zdroj:[15]

*Villon* umožňuje výstavbu simulačních modelů železničního provozu po jednotlivých podsystémech (kolejiště v měřítku, posunovací lokomotivy, tranzitní vlaky, technologie atd.). Na rozdíl od nástroje *OpenTrack* není model infrastruktury založený na zjednodušeném schématickém přístupu, ale aplikuje reálné měřítko, a tedy respektuje všechny podstatné fyzikální vlastnosti prvků infrastruktury (Obrázek 6). Data popisující kolejiště mohou být importována přímo (například z formátu *DXF*) nebo dodatečně upravována za použití specializovaného editoru *E3it*. Model infrastruktury může obsahovat informace o signalizačních zařízeních, budovách, nástupištích, a podobně. *Villon* umožňuje 3D vizualizaci kolejiště, pro její podporu se může model infrastruktury rozšířit o další údaje (například o výšku jednotlivých prvků a o reliéf terénu).

Simulátor je založený na nejmodernější technice počítačové simulace, agentově orientované simulaci. Model provozu uplatňuje mikroskopickou úroveň podrobnosti, kde je pohyb vlaků modelován s využitím spojité simulace. Výpočet pohybu vlaků bere v úvahu nejen například trakční charakteristiku hnacího vozidla, ale také parametry infrastruktury jako poloměry oblouků, sklony, maximální povolené rychlosti a podobně. V rámci pohybu vlaků po kolejišti jsou dodržovány dopravní předpisy, a tedy vlaky respektují obsazenosti kolejí, zabezpečovací systémy (například i různé typy autobloků), návěstidla, atd. Definování provozních procesů je realizováno s využitím síťového grafu nazývaného jako technologie. Síťový graf se skládá z aktivit, které reprezentují jednotlivé úlohy v rámci obsluhy (například pohyb vlaku, nakládání, přidělování zdrojů atd.). Každá aktivita je složena z množiny parametrů a zdrojů, které jsou nutné pro její provedení. Propojení aktivit v rámci síťového grafu poté určuje jejich vzájemnou závislost v procesu obsluhy.

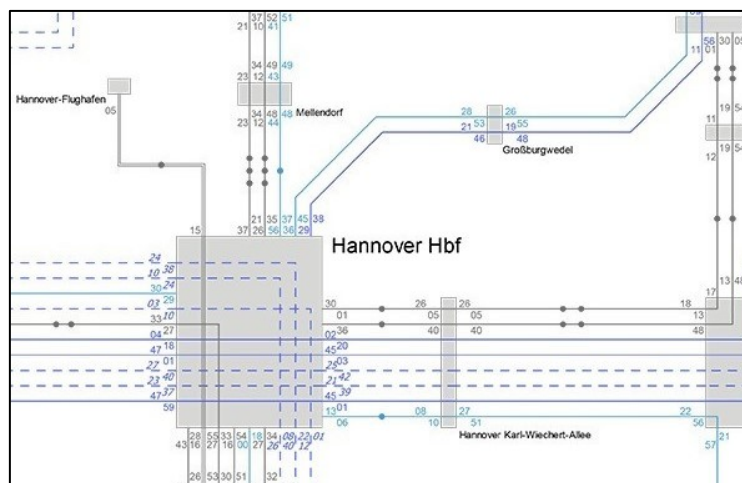
Z pohledu simulace železničního provozu představuje nástroj *Villon* experimentální prostředí pro zkoumání důsledků změny konfigurace infrastruktury, technologických procesů, intenzity dopravy a podobně. Zároveň nabízí možnost uložení průběhu simulačního experimentu do protokolu, který slouží uživateli pro následné post-simulační vyhodnocení (obsazenosti kolejí, činnosti zdrojů, splněný grafikon a podobně).

### 4.3 RailSys

*RailSys* [16, 52, 54, 55] patří do třídy mikroskopických simulačních nástrojů, který slouží převážně k vyhodnocení dopadů změn v rámci železničních systémů. Mezi typické úlohy, které lze pomocí tohoto nástroje řešit, lze zařadit například optimalizace jízdních řádů, kapacit tratí a železničních stanic při změnách infrastruktury nebo intenzit dopravy ve vybrané oblasti železniční sítě.

Železniční infrastruktura v nástroji *RailSys* (Obrázek 7) je modelována na mikroskopické úrovni (za použitím editoru *Sted*). Všechny traťové parametry lze zadat s přesností jednoho metru, což umožňuje dosáhnout přesných výsledků simulace. Úroveň podrobnosti vybraného modelu železniční sítě bere v úvahu všechny relevantní aspekty infrastruktury, tedy i poloměry oblouků, přechodnice, nástupiště, přípustné rychlosti, světelnou signalizaci a podobně.

Pro simulaci pohybu vlaků po infrastruktuře a přesný výpočet jejich jízdních dob se využívá zabudovaný nástroj *DYNAMIS*. Pro simulaci reálného pohybu jsou využity základní informace o vlacích, mezi které lze zahrnout trakční charakteristiku, maximální rychlost, hmotnost a délku, a podobně. Při pohybech vlaků mohou být uplatněny i různé zabezpečovací systémy, například zabezpečovací systém ETCS, rádiově či automaticky řízený provoz ATC. *RailSys* samozřejmě umožňuje i stochastickou simulaci, kdy může být každému vlaku přiděleno náhodné zpoždění. Jízdní řády jsou potom posuzovány z pohledu jejich stability a robustnosti.



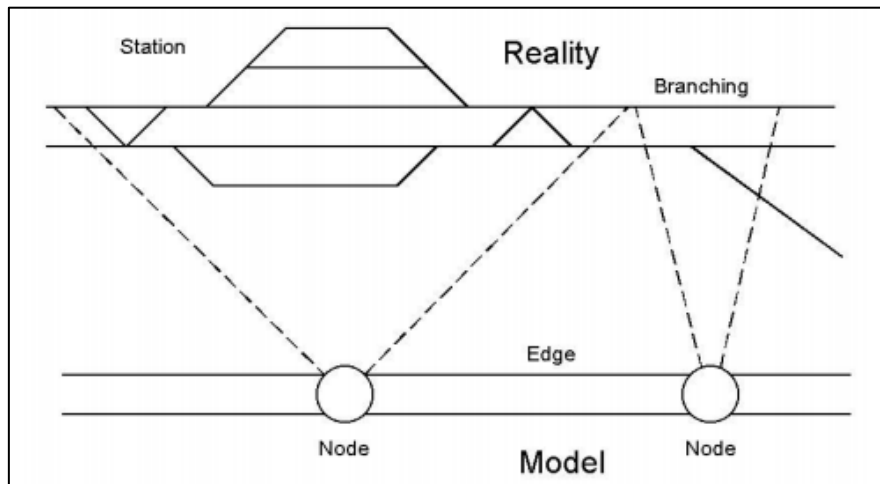
Obrázek 7 - Model infrastruktury v nástroji *RailSys*. Zdroj:[54]

Simulátor je zejména zaměřen na optimalizaci plánovacích procesů, analýzu kapacit tratí a podporu konstrukce jízdních řádů.

### 4.4 NEMO

*Nemo* (*Network Evaluation Model*) [6, 28] je makroskopický simulační nástroj železničního provozu určený pro strategické plánování a hodnocení provozu. Simulační nástroj slouží především pro vyhodnocení využívání infrastruktury a operačních opatření pro řízení

dopravních železničních systémů. Kromě toho, že umožňuje vyhodnotit dopady na provoz v případě provedených změn v infrastruktuře, dokáže odhadnout vliv nových dopravních služeb na provoz. Tento simulační nástroj se využívá především k hledání optimálního zatížení dopravní sítě osobní a nákladní dopravou (hodnotícím kritériem mohou být příjmy/náklady spojené s různým typem služeb).



Obrázek 8 - Model infrastruktury v nástroji NEMO. Zdroj:[28]

Dopravní síť je reprezentována grafem (Obrázek 8), kde železniční stanice, kolejové křižovatky, vstupní místa nákladní i osobní dopravy a podobně jsou reprezentovány vrcholy. Vrcholy jsou pak v souladu s teorií grafů propojeny hranami (tratěmi), pro něž jsou definovány další atributy blíže popisující jejich vlastnosti.

Osobní a nákladní doprava je v nástroji reprezentována odlišnými modely provozu. Oba modely provozu vychází z agregovaného modelu infrastruktury, ale také z předpokládaného jízdního řádu. Ten obsahuje potřebné informace pro hodnocení provozu (například jízdní doby jednotlivých vlaků, jejich skladby, počáteční a cílové pozice na infrastruktuře, a podobně). Jinými slovy, může obsahovat i budoucí požadované změny pro konkrétní typ dopravy.

Mezi hlavní výstupy nástroje lze zahrnout například vyhledání úzkých provozních míst z pohledu jízdního řádu, kde je nedostatečná kapacita dopravní sítě dle různých hodnotících kritérií. Na druhé straně, pro tyto problémy nástroj umožňuje vyhledávat i vhodná řešení z pohledu nalezení alternativních tras, změny rychlosti vlaků, změny infrastruktury a podobně, s cílem vytvořit například lépe vyhovující jízdní řád.

#### 4.5 Další nástroje

Okrajově lze zmínit i další simulační nástroje, jejichž účelem nemusí být jen simulace železničního provozu pro určování propustnosti a podobně, ale také analýza provozu zabezpečovacích zařízení či energeticky optimálních jízd vlaků.

Softwarový nástroj *Luks* [29] (využíván na *Deutsche Bahn*) je integrovaný mikroskopický simulátor především grafikonu železničního provozu, který disponuje analytickým

hodnocením kapacity a kvality provozu, hodnocením kapacity tratí, křižovatek a stanic. Slouží pro podporu vytváření jízdních řádů, či je umožňuje na základě informací o pohybu vlaků interaktivně editovat. Podobně lze uvést i simulační nástroje *RTC (Rail Traffic Controller)* [57] nebo *Railsim* [58].

Z nástrojů umožňujících modelování rozsáhlých železničních systémů lze uvést například simulátor *INCONTROL* [56], který umožňuje hodnocení jízdních řádů, změny infrastruktury, spotřebované energie, kapacity tratí a podobně.

K simulaci železničních procesů se může využít i simulační software *AnyLogic* [59], který lze aplikovat na různá průmyslová odvětví včetně železnice. Jeho výhodou může být rychlé vybudování modelu dopravní sítě, podpora 2D nebo 3D vizualizace, analýza procesů (například nakládky nebo vykládky) a podobně.

Mezi nástroje, které se specializují na optimalizaci konfigurace systému napájení, lze uvést *Etrax* [32] a *Energplan* [33]. *Etrax* je softwarový nástroj pro analýzu, řízení a simulaci nízko a středně napěťových systémů napájení vlaků. Slouží k vyhodnocení správného umístění rozvodů a jejich kapacity a umožňuje tak zlepšit spolehlivost elektrického trakčního vedení. *Energplan* je simulační nástroj se schopností analyzovat a optimalizovat konfiguraci napájení železničního systému a minimalizovat spotřebu energie kompletního systému.

## 5 Návrh unitárního hybridního simulačního modelu železničního provozu

Z pohledu tradičních přístupů v oblasti simulací železničního provozu je standardní aplikovat stejnou úroveň podrobnosti na celý simulující systém. Tento přístup neumožňuje kombinovat v jednom simulátoru mikroskopickou a makroskopickou úroveň podrobnosti, a tedy měnit *granularitu* pouze části simulujícího systému. Zejména s ohledem na potřeby designerů dopravních simulací existuje silná motivace využívání metodik, které by umožnily oblasti železniční sítě, kde je zapotřebí detailně zkoumat dopravní provoz, modelovat na mikroskopické úrovni. Na druhé straně oblasti, kde postačuje sledovat pouze hrubé provozní charakteristiky, postačí modelovat na makroskopické úrovni.

Vlastní navrhovaná metodika *ScalRail* využívá tzv. hybridní model implementovaný v rámci jednoho simulačního nástroje (*unitární hybridní model*). Metodika je založena na kombinaci uplatňování nehomogenních submodelů, které aplikují buď mikroskopickou anebo makroskopickou úroveň podrobnosti. *Mikroskopická simulace* je spojena s konkrétními oblastmi, v jejichž rámci jsou pro experimentátora důležité detaily o provozu (a infrastruktuře). Naproti tomu *makroskopická simulace* je uplatněna na ty části simulátoru, z nichž je postačující získávání hrubších provozních charakteristik. Unitární hybridní model vzhledem k charakteru simulace provozu tak umožňuje měnit *granularitu* pouze části simulátoru, to znamená submodely provozu pro jednotlivé submodely infrastruktury. Celková výpočetní náročnost unitárního hybridního modelu je samozřejmě nižší, než by tomu bylo u porovnatelného modelu, který by jednotně uplatňoval pouze mikroskopickou simulaci.

Pro vybudování unitárního hybridního modelu je potřeba zvládnout řešení následujících problémů:

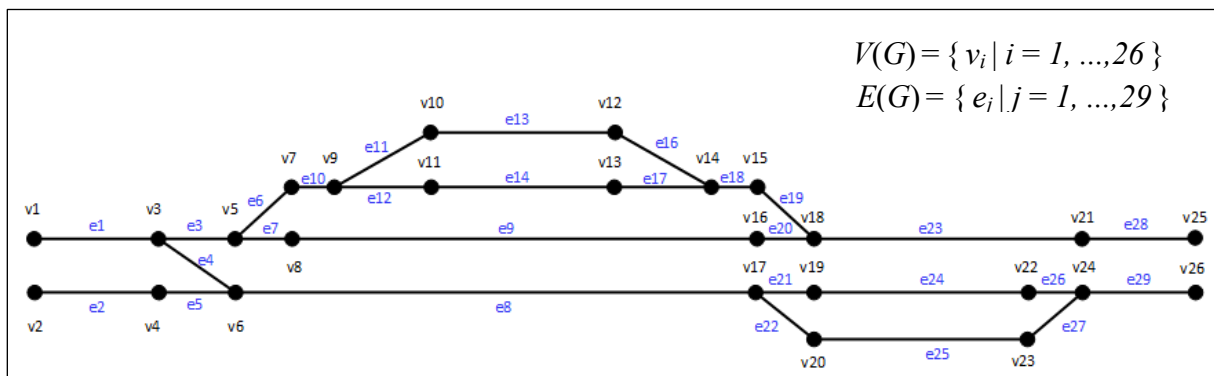
- konstrukce mikroskopického modelu infrastruktury,
- konstrukce nadstavbového hybridního modelu infrastruktury zahrnujícího submodely uplatňující odlišné úrovně podrobnosti (mikroskopickou a makroskopickou),
- konstrukce odlišných submodelů provozu aplikované pro odlišné submodely zahrnuté do hybridního modelu infrastruktury,
- transformace dopravních toků na rozhraní odlišných submodelů provozu.

## 6 Návrh hybridního modelu infrastruktury

Z pohledu metodiky budování hybridního simulačního modelu železničního provozu je v této kapitole systematicky popsán postup vytváření submodelů infrastruktury. Výsledný model infrastruktury je v první fázi vybudován na mikroskopické úrovni podrobnosti a následně je na vybrané oblasti aplikována vyšší úroveň abstrakce (makroskopická). Vzniká tak hybridní model infrastruktury, který představuje kombinaci oblastí uplatňujících různou míru abstrakce.

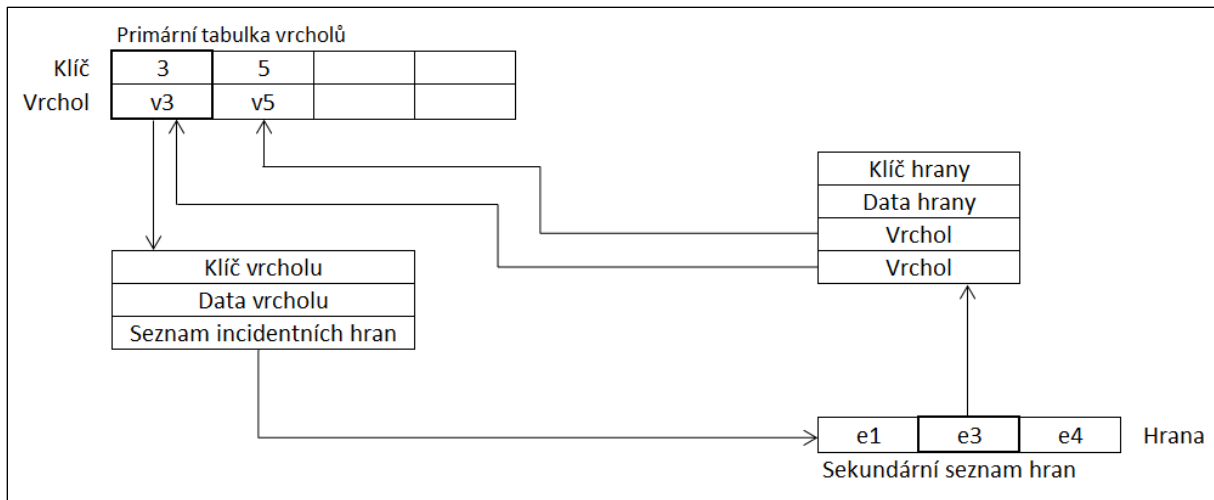
### 6.1 Reprezentace železniční infrastruktury

Hlavním problémem vybudování modelu železniční infrastruktury je problém její reprezentace na počítači. V této souvislosti je vhodné využít znalostí z teorie grafů a příslušných algoritmů [24]. Z hlediska potřeb zpracovávané domény lze pro vytváření modelu kolejiště využít *neorientovaný graf*  $G = (V, E, \Phi)$ , jenž je tvořen konečnou neprázdnou množinou vrcholů  $V$ , konečnou množinou hran  $E$  a funkcí  $\Phi$ , která přiřazuje každé hraně právě dva krajní vrcholy (Obrázek 9).



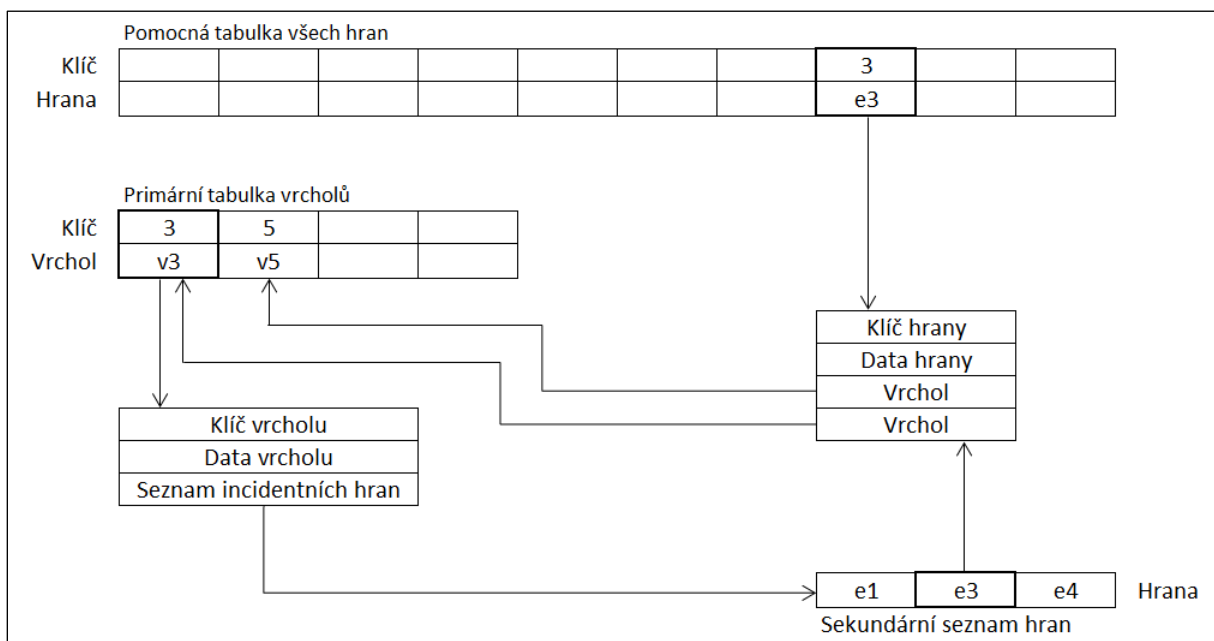
Obrázek 9 – Grafická ilustrace modelu železniční infrastruktury. Zdroj: vlastní

Pro implementaci zmíněného grafu je nutné zvolit vhodné datové struktury, které umožňují efektivní výpočty příslušných algoritmů. Datové struktury popisující graf se dají rozdělit do dvou základních skupin. Jedná se o struktury s vrcholově resp. hranově orientovaným přístupem, což znamená, že zejména základní vyhledávací operace nad grafem jsou orientovány na vyhledávání vrcholů, resp. hran. Pro úlohy na grafech, které je nutné řešit v rámci hybridního modelu kolejiště, je využít vrcholově orientovaný přístup spojený s konkrétní datovou strukturou typu *dopředná hvězda* [39]. Pro konkrétní implementaci primární struktury v rámci dopředné hvězdy je využita hashovací tabulka (Obrázek 10), a to za účelem vyhledávání vrcholů s konstantní výpočetní složitostí  $O(1)$ . Z pohledu sekundární struktury, která uchovává pro každý vrchol pouze omezené množství incidentních hran, je využita datová struktura *lineární seznam*.



Obrázek 10 - Dopředná hvězda. Zdroj: vlastní

Z pohledu efektivního vyhledávání ve struktuře hran, je výše diskutovaná implementace nedostatečná, protože pro vyhledávání konkrétní hrany by muselo docházet k iterativnímu průchodu incidentních hran všech vrcholů grafu. Z toho důvodu byla vnitřní struktura vybrané reprezentace typu dopředná hvězda rozšířena o hashovací tabulku všech hran (Obrázek 11) tak, aby umožňovala vyhledávat nejen vrcholy, ale i hrany s konstantní výpočetní složitostí.

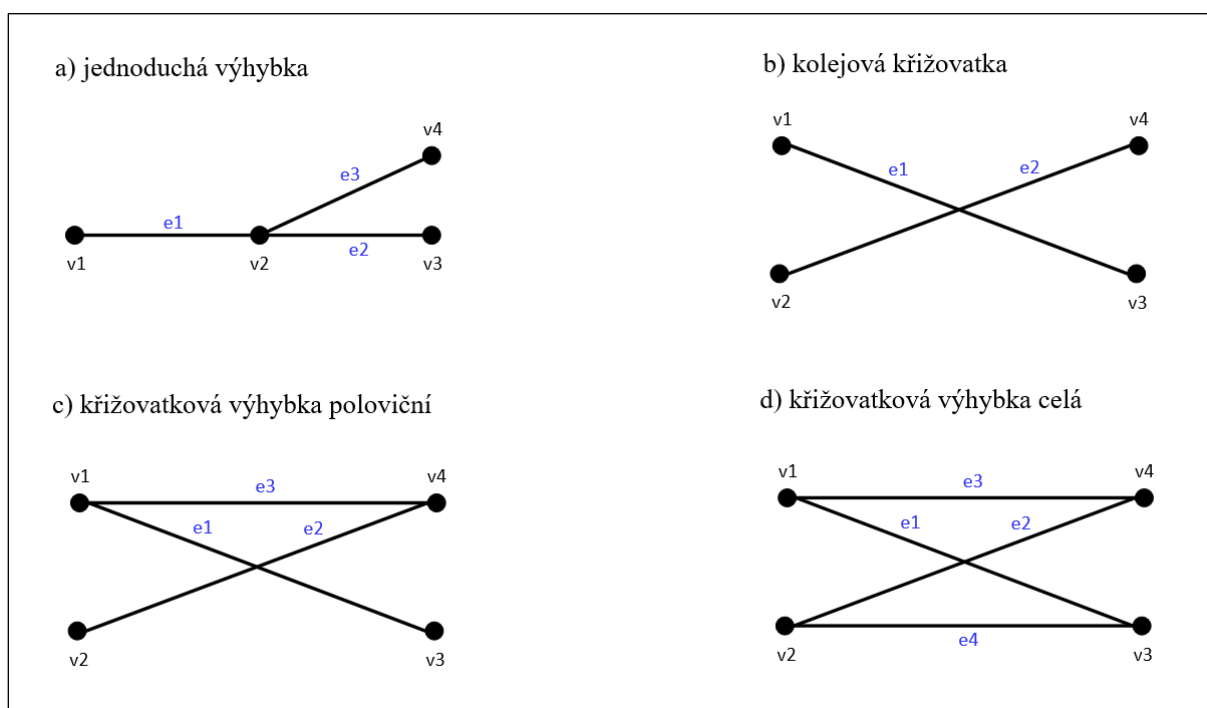


Obrázek 11 - Vnitřní struktura vybrané reprezentace neorientovaného grafu. Zdroj: vlastní

Představená reprezentace železniční infrastruktury je v průběhu editace vybraného modelu kolejíště (a také zejména při běhu simulačního experimentu) alokována v operační paměti. Pro archivaci modelu kolejíště je využita implementace v externí paměti, ze které lze model železniční infrastruktury před zahájením simulace staticky vybudovat v paměti operační.

V rámci uvedené implementace datové struktury graf, využívané za účelem uchování modelu dopravní sítě, bylo navíc nutné implementovat některé z potřebných grafových algoritmů. Ty jsou později použity v určitých fázích budování anebo používání hybridního modelu kolejistiště. Mezi tyto algoritmy lze zařadit prohledávání grafu do šířky/hloubky, hledání nejkratších cest mezi vrcholy dle definovaných kritérií nebo například i hledání všech dostupných cest mezi dvěma vrcholy a podobně.

Při budování modelu železniční infrastruktury je potřeba využití i kolejových objektů typu výhybka, případně kolejová křižovatka a podobně. V rámci modelu infrastruktury jsou podporovány *jednoduché výhybky*, různé druhy *křižovatkových výhybek* a *kolejové křižovatky*. Jejich reprezentace pomocí grafu jsou uvedeny na obrázku níže (Obrázek 12).



Obrázek 12 - Reprezentace podporovaných typů výhybek pomocí grafu. Zdroj: vlastní

## 6.2 Mikroskopický model infrastruktury

Pro budování hybridního modelu kolejistiště je potřeba mít nejdříve k dispozici takový prvotní model infrastruktury, který odráží nejvyšší míru podrobnosti, kterou lze na danou železniční infrastrukturu aplikovat. Z tohoto důvodu vznikl původní editační nástroj, který ulehčil, urychlil a částečně zautomatizoval výstavbu mikroskopického modelu infrastruktury.

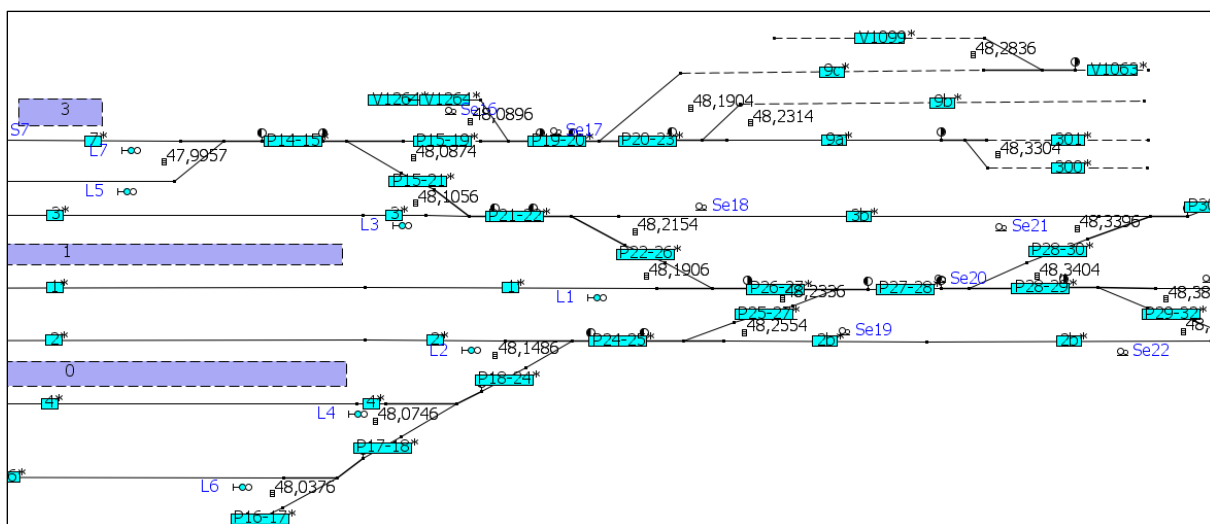
Z pohledu zmíněného editoru [20] (s názvem *TrackEd – Track infrastructure Editor*) je potřeba rozlišovat mezi vizualizační prezentací kolejové infrastruktury (specifikované ve *vizualizační vrstvě*) a definováním numerických údajů (specifikovaných v *datové vrstvě*) o metrických, topologických a sklonových poměrech uchovávaných v příslušných datových strukturách pro potřeby výpočtu zejména dynamiky jízd vlaků.



Pro potřeby schématického přístupu k vizualizaci infrastruktury (která je v editoru podporována) je uplatněna vyšší míra abstrakce, která vede ke značnému urychlení procesu tvorby modelu kolejíště. Primárně tedy není požadováno grafické znázornění infrastruktury v měřítku a to zejména s ohledem na vizuální deformace při konstrukci nehomogenních submodelů infrastruktury a jejich propojování v rámci představované metodiky. Na druhé straně, parametrizace objektů infrastruktury v rámci příslušné datové struktury (definující topologické, metrické a sklonové poměry v kolejíšti) věrně odráží reálnou situaci, a proto je možné provádět realistické výpočty ohledně jízd vlaků.

## Sledované objekty

Při tvorbě výsledného modelu železniční infrastruktury v rámci editoru (Obrázek 13) jsou realisticky uvažovány izolované obvody, rozmístění návěstidel a námezníků (a s tím spojených užitečných délek kolejí). Dále je zohledněna elektrifikace a rychlostní omezení na jednotlivých kolejových elementech. Při bližším pohledu na model kolejíště, který lze v rámci představeného editoru vytvořit, jsou sledovány základní elementy infrastruktury jako *koleje*, *výhybky*, *kolejové křižovatky*, *návěstidla*, *námezníky*, *nástupiště* a případně *staniční budovy* [25, 26].



Obrázek 13 - Mikroskopický model infrastruktury v editoru TrackEd. Zdroj:[20]

Vizuální podoba schématického znázornění kolejíště je založena zejména na využívání lomených čar, což ve výsledku znamená, že nejsou podrobněji znázorněny složitější tvary typu oblouk, přechodnice a podobně. Koncept schématického znázornění s možností vizuálních deformací jednotlivých objektů železniční infrastruktury, bez ztráty či změny reálných metrických, sklonových a zejména topologických poměrů definovaných „za“ vizualizační vrstvou (tj. v *datové vrstvě*), podporuje rychlé „manuální“ vybudování modelu kolejíště ve zmíněném editoru.

Pro paměťovou reprezentaci kolejové infrastruktury (modelované na mikroskopické úrovni) je využívána datová struktura typu neorientovaný graf (představená v předchozí podkapitole). Objekty této struktury typu *hrana* odrážejí atomické kolejové úseky nesoucí základní



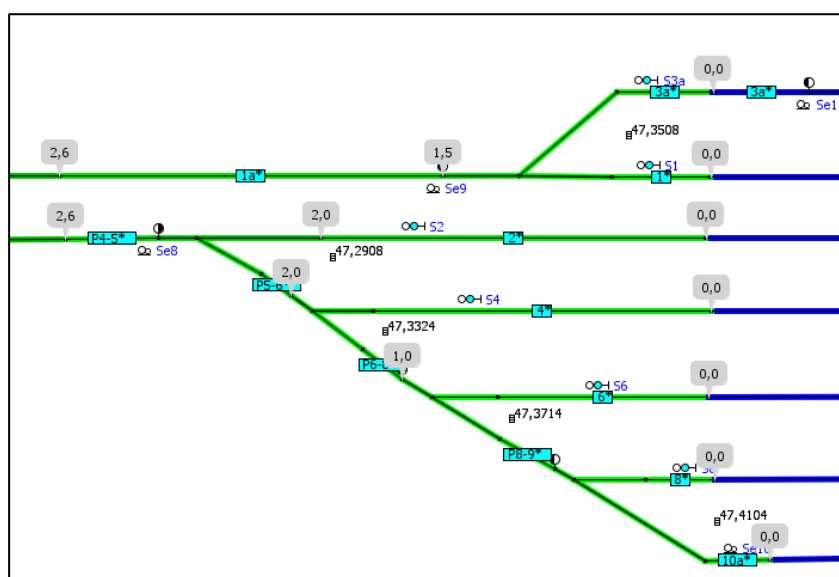
Editor disponuje funkcí poloautomatického výpočtu kompletní množiny primárních a alternativních vlakových cest pro všechna možná přemístění vlaků ve zkoumaném kolejišti (Obrázek 15). Každá vlaková cesta se skládá z atomických kolejových úseků tvořících souvislý podgraf železniční infrastruktury. Každé z těchto cest je expertně přiřazena její priorita, která slouží v průběhu simulačního experimentu k výběru takové vhodné vlakové cesty, která je v aktuálně obsazeném kolejišti reálně použitelná.

### Automatizovaná kontrola mikroskopického modelu infrastruktury

Z pohledu simulátoru může být každá nepřesnost v modelu infrastruktury příčinou zkreslených či dokonce špatných výsledků simulačních experimentů. Nejčastějším důvodem je nedostatečně zkontrolovaný návrh modelu kolejiště v editoru před jeho finálním importem do simulátoru. Nepřesnosti ve formě špatně zadaného sklonu, poloměru oblouku či maximálních přípustných rychlostí na úrovni jednotlivých kolejových elementů, jsou při simulaci prakticky neodhalitelné. Proto existoval při vývoji editoru silný důraz na implementaci sofistikovaných funkcionalit, pro odhalení hrubých ale i méně závažných chyb tohoto typu. Funkce pro validaci vybudovaného modelu kolejiště se dají rozdělit do následujících základních skupin:

- funkce vizuální podpory,
- funkce automatizované kontroly.

Pro vizuální kontrolu vybudovaného modelu infrastruktury lze využít *vizuálních pohledů* (Obrázek 16), které zvýrazňují uživatelsky definované skupiny atributů u příslušných kolejových objektů, přičemž v *TrackEd* editoru jsou realizované dva jejich typy. Jedná se o vizuální pohledy, které zvýrazňují ty vrcholy, u jejichž incidentních hran dochází ke změně sklonu, poloměru oblouků a maximálních povolených rychlostí pro zvolený typ vlaku a to pro oba směry jízdy. Vizuální pohledy druhého typu barevně odlišují jednotlivé kolejové elementy dle jejich hodnot nastavených v datové vrstvě.

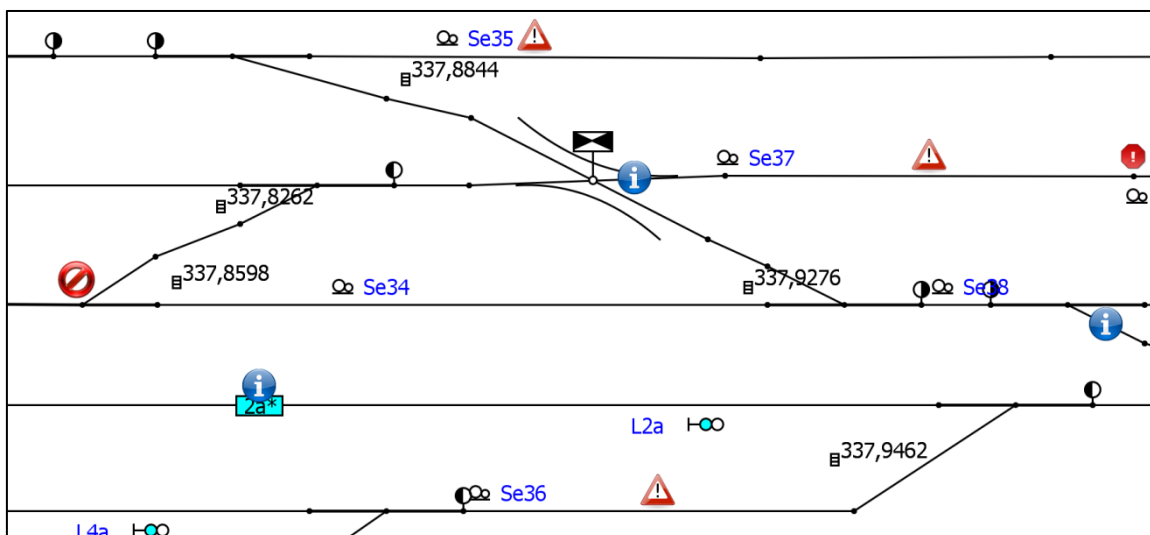


Obrázek 16 - Pohled na změny sklonů v editoru TrackEd. Zdroj:[20]

V *TrackEd* editoru je pro důslednější kontrolu výsledného modelu infrastruktury podporována kromě vizuálních pohledů i automatizovaná kontrola (Obrázek 17). Ta využívá skupinu funkcí, které slouží k odhalování hrubých, ale i informativních chyb v návrhu. Hrubou chybou je myšlena taková chyba, která má zásadní vliv na simulační experiment. Výčet sledovaných hrubých chyb je následující:

- chybějící lokalizace vrcholů,
- nekonzistentní délka kolejového segmentu (hrany) vzhledem k zadaným koordinátům jeho krajních bodů (vrcholů),
- chybějící nebo nesouvislý izolovaný obvod,
- nesouvislá vlaková cesta.

Na druhé straně informativními chybami jsou myšleny například absence námezníků, nevhodně zvolený typ návěstidel u kolejového elementu nebo jejich nesprávné umístění a podobně.



Obrázek 17 - Výsledek automatizované kontroly v editoru *TrackEd*. Zdroj:[20]

### Migrace mikroskopického modelu infrastruktury

Důležitou součástí každého editoru (železniční) infrastruktury musí být funkce, která umožní aktuální verzi infrastruktury uložit na, respektive načíst z externího paměťového média. V rámci nástroje *TrackEd*, může být výsledný (vizuální) schématický plán kolejíště jednak ve stejném nástroji později dále zpracováván, a jednak potenciálně využíván i v rámci jiné softwarové aplikace. Pro tuto migraci infrastruktury mezi dvěma odlišnými aplikacemi je zapotřebí vybrat takový typ přenosu, který bude univerzální, dobře validovatelný a velice rychle upravitelný v případě rozšířených požadavků na podrobnost infrastruktury. Pro tyto účely byl vybrán přenos pomocí souboru ve formátu XML, který lze navíc prohlížet a případně i upravovat v jakémkoli textovém editoru.

V rámci vývoje byla vytvořena vlastní šablona (Obrázek 18), jejíž inspirací je univerzální standard railML [49], který mimo jiné předepisuje jednotné šablony pro uložení infrastruktury

ve formátu XML. Tento standard není editorem *TrackEd* zcela využit, a to z důvodu jednak jeho nadměrné komplexnosti, a jednak absence některých elementů, které jsou specifické pro vybraný vizuální schématický popis kolejové infrastruktury.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<infrastructure>
  - <nodes>
    <node id="329_0" y="8.0" x="1957.0" realY="-1.0" realX="-1.0" prototypeID="329" point="0" km="99.8"/>
    <node id="329_1" y="8.0" x="2043.0" realY="-1.0" realX="-1.0" prototypeID="329" point="1" km="99.5"/>
    <node id="328_0" y="8.0" x="1862.0" realY="-1.0" realX="-1.0" prototypeID="328" point="0" km="100.0"/>
    <node id="329_0" y="8.0" x="1957.0" realY="-1.0" realX="-1.0" prototypeID="328" point="1" km="99.8"/>
    <node id="327_0" y="8.0" x="1786.0" realY="-1.0" realX="-1.0" prototypeID="327" point="0" km="100.27"/>
    <node id="328_0" y="8.0" x="1862.0" realY="-1.0" realX="-1.0" prototypeID="327" point="1" km="100.0"/>
    <node id="326_0" y="8.0" x="1699.0" realY="-1.0" realX="-1.0" prototypeID="326" point="0" km="100.57"/>
    <node id="327_0" y="8.0" x="1786.0" realY="-1.0" realX="-1.0" prototypeID="326" point="1" km="100.27"/>
  </nodes>
  <edges>
    - <edge id="329_01" prototypeID="329" startNodeID="329_0" prototypeType="SEGMENT" prototypeKM="-1.0" endNodeID="329_1">
      <setting trackType="Tratova" trackSection="" trackName="" length="299.9999999999716" isolationID="279" gradient="6.7" electrification="AC"
        arc="0.0"/>
      - <speeds orientation="LR">
        <speed value="75.0" type="EC"/>
        <speed value="75.0" type="Pv"/>
        <speed value="75.0" type="IC"/>
      </speeds>
      <trackingPoints/>
      - <entities>
        <entity y="174.0" x="3300.0" km="54.711" orientation="LR" type="AB3" name="2-548"/>
        <entity y="194.0" x="3300.0" km="54.711" orientation="RL" type="AB3" name="2-547"/>
      </entities>
    </edge>
  </edges>
  - <paths>
    <path startNodeID="430_1" endNodeID="448_1"
      value="430_01;418_12;418_01;504_01;413_12;413_01;412_01;408_01;408_12;509_01;501_01"
      name="1" speedPercentage="100.0" priority="1" group="H-B"/>
  </paths>
  - <platforms>
    <platform id="0" y="204.0" x="-505.0" width="544.5" kmStart="47.723" kmEnd="48.023" height="24.0" edges="496_221;497_221"/>
    <platform id="1" y="90.0" x="-507.0" width="542.0" kmStart="47.723" kmEnd="48.023" height="20.5" edges="455_111;498_221"/>
    <platform id="2" y="-2.66666669845581055" x="-462.1666564941406" width="161.16665649414062" kmStart="47.797" kmEnd="47.887"
      height="24.499999046325684" edges="499_01;501_01"/>
    <platform id="3" y="-51.75" x="-279.1666564941406" width="80.66665649414062" kmStart="47.904" kmEnd="47.964" height="26.0"
      edges="87_01"/>
  </platforms>
</infrastructure>
```

Obrázek 18 - Šablona mikroskopického modelu infrastruktury editoru *TrackEd*. Zdroj: vlastní

Vlastní šablona je navržena tak, aby v případě změny vlastností některých objektů infrastruktury co nejméně měnila svoji strukturu, a tak i mechanismy svého zpracování v editoru. Šablona je strukturována do oddělených bloků, které popisují různé části navrhovaného modelu kolejistiště. Tím jsou myšleny převážně *vrcholy*, *hrany*, *vlakové cesty* a *nástupiště*. Pro potřeby editoru umožňuje šablona v rámci své struktury uložit prototypy respektive všechny jejich elementární objekty tak, aby je při jejich načítání byl editor schopný identifikovat a správně sestavit. To je důležité zejména v situacích, kdy je potřeba uložit rozpracovaný model, na kterém se bude v budoucnu pracovat.

### 6.3 Hybridní model infrastruktury

Z pohledu dále formulované metodiky je v této kapitole systematicky popsán postup vytváření hybridního modelu infrastruktury, který kombinuje oblasti uplatňující různou míru podrobnosti.

#### 6.3.1 Algebraická formalizace modelu infrastruktury

Budovaný hybridní model infrastruktury, který je reprezentovaný neorientovaným grafem, ctí základní vlastnosti popsané v níže uvedené *algebraické specifikaci modelů kolejistiště* (Tabulka 1). Další specifikace (Tabulka 2) definuje vlastnosti *makro-segmentů* v rámci hybridního modelu kolejistiště.

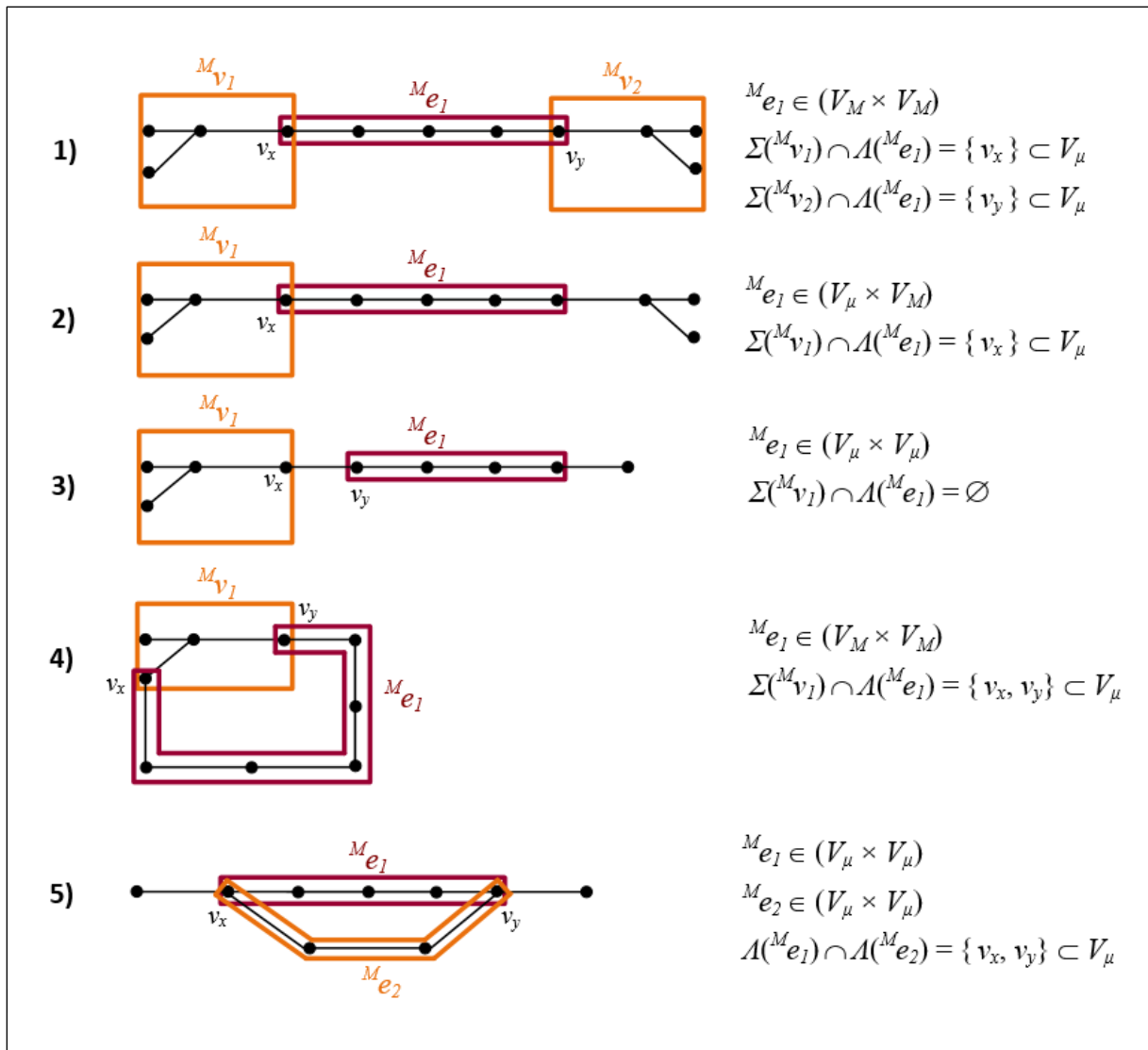
Symbol	Specifikace
$G$	neorientovaný graf $G$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>G = (V, E, \Phi)</math></li> <li>▪ model infrastruktury kolejí na <i>mikroskopické</i> úrovni podrobnosti</li> </ul>
$V(G)$	množina vrcholů grafu $G$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>V(G) = \{v_i   i = 1, \dots, n\}, n =  V(G) </math></li> </ul>
$E(G)$	množina hran grafu $G$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>E(G) = \{e_j   j = 1, \dots, m\},  E(G)  = m</math></li> </ul>
$\Phi$	incidenční funkce grafu $G$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\Phi: E(G) \rightarrow \{(v_i, v_j)   (v_i, v_j) \in V(G) \times V(G) \wedge v_i \neq v_j\}</math></li> </ul>
$G_H$	neorientovaný graf $G_H$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>G_H = (V_H, E_H, \Psi, \Sigma, A)</math></li> <li>▪ <i>hybridní</i> model infrastruktury kolejí nad grafem <math>G</math></li> </ul>
$V_H(G_H)$	množina vrcholů grafu $G_H$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>V_H(G_H) = V_\mu(G_H) \cup V_M(G_H)</math></li> <li>▪ <math>V_\mu(G_H) \subset V(G)</math></li> <li>▪ <math>V_M(G_H) = \{^M v_i   i = 1, \dots, p\}, p =  V_M(G_H) </math></li> <li>▪ vrcholy z množiny <math>V_M</math> představují tzv. <i>makro-vrcholy</i></li> </ul>
$E_H(G_H)$	množina hran grafu $G_H$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>E_H(G_H) = E_\mu(G_H) \cup E_M(G_H)</math></li> <li>▪ <math>E_\mu(G_H) \subset E(G)</math></li> <li>▪ <math>E_M(G_H) = \{^M e_j   j = 1, \dots, q\}, q =  E_M(G_H) </math></li> <li>▪ hrany z množiny <math>E_M</math> představují tzv. <i>makro-hrany</i></li> </ul>
$\Psi$	incidenční funkce grafu $G_H$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\Psi: E_H(G_H) \rightarrow \{(v_i, v_j)   (v_i, v_j) \in [(V_\mu(G_H) \times V_\mu(G_H)) \cup (V_\mu(G_H) \times V_M(G_H)) \cup (V_M(G_H) \times V_M(G_H))]\}</math></li> </ul>
$\Sigma$	mapovací funkce <i>makro-vrcholů</i> grafu $G_H$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\Sigma: V_M(G_H) \rightarrow \{S   S \subset (V(G) \cup E(G))\}</math></li> <li>▪ <i>makro-vrcholy</i> odrážejí souvislé podgrafy grafu <math>G</math></li> </ul>
$A$	mapovací funkce <i>makro-hran</i> grafu $G_H$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>A: E_M(G_H) \rightarrow \{L   L \subset (V(G) \cup E(G))\}</math></li> <li>▪ <i>makro-hrany</i> odrážejí liniové souvislé podgrafy grafu <math>G</math></li> </ul>
$L$	liniový souvislý podgraf grafu $G$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>L = (V', E', \Phi)</math></li> <li>▪ <math>V'(L) \subset V(G), E'(L) \subset E(G)</math></li> <li>▪ <math>\exists! v_i \in V'(L) \wedge \exists! v_j \in V'(L), v_i \neq v_j: \deg(v_i) = 1, \deg(v_j) = 1</math></li> <li>▪ <math>I = V'(L) - \{v_i, v_j\}</math></li> <li>▪ jestliže <math>I \neq \emptyset</math> pak <math>\forall v_k \in I: \deg(v_k) = 2</math> (<math>v_k</math> je tzv. <i>vnitřním</i> vrcholem)</li> <li>▪ funkce stupeň vrcholu: <math>\deg(v) =  \{e \in E'(L)   v \in e\} </math></li> </ul>

Tabulka 1 - Algebraická specifikace modelů kolejí. Zdroj: vlastní

	Specifikace makro-segmentů grafu $G_H$	Vlastnosti makro-segmentů grafu $G_H$
1	$\forall v_i, v_j \in V_M(G_H),$ $v_i \neq v_j:$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\Sigma(v_i) \cap \Sigma(v_j) = \emptyset</math></li> <li>▪ dvojice podgrafů grafu <math>G</math>, které jsou mapovány <i>makro-vrcholy</i>, jsou vždy vzájemně disjunktční</li> </ul>
2	$\forall v_i \in V_M(G_H),$ $\forall e_j \in E_M(G_H):$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\Sigma(v_i) \cap A(e_j) = \emptyset \vee</math></li> <li>▪ <math>\Sigma(v_i) \cap A(e_j) = \{v_k\}; v_k \in V(G) \vee</math></li> <li>▪ <math>\Sigma(v_i) \cap A(e_j) = \{v_k, v_l\}; v_k, v_l \in V(G); v_k \neq v_l</math></li> <li>▪ dvojice podgrafů grafu <math>G</math>, které jsou mapovány <i>makro-vrcholy</i> a <i>makro-hranami</i>, jsou buď vzájemně disjunktční nebo je jejich průnik tvořen jednoprvkovou či dvouprvkovou množinou vrcholů z <math>V(G)</math></li> </ul>
3	$\forall e_i, e_j \in E_M(G_H),$ $e_i \neq e_j:$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>A(e_i) \cap A(e_j) = \emptyset \vee</math></li> <li>▪ <math>A(e_i) \cap A(e_j) = \{v_k\}; v_k \in V(G) \vee</math></li> <li>▪ <math>A(e_i) \cap A(e_j) = \{v_k, v_l\}; v_k, v_l \in V(G); v_k \neq v_l</math></li> <li>▪ dvojice podgrafů grafu <math>G</math>, které jsou mapovány <i>makro-hranami</i>, jsou buď vzájemně disjunktční nebo je jejich průnik tvořen jednoprvkovou či dvouprvkovou množinou vrcholů z <math>V(G)</math></li> </ul>
4	$\forall v_i \in V_M(G_H):$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>Z \cap V_\mu(G_H) = \emptyset</math> <math>Z = \Sigma(v_1) \cup \Sigma(v_2) \cup \dots \cup \Sigma(v_p), p =  V_M(G_H) </math></li> <li>▪ vrcholy zahrnuté do podgrafů grafu <math>G</math>, které jsou mapovány <i>makro-vrcholy</i>, nejsou součástí hybridního grafu <math>G_H</math></li> </ul>
5	$\forall e_j \in E_M(G_H):$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>A(e_j) \cap V_\mu(G_H) = \emptyset; e_j \in (V_M(G_H) \times V_M(G_H)) \vee</math></li> <li>▪ <math>A(e_j) \cap V_\mu(G_H) = \{v_k\}; v_k \in V_\mu(G_H); e_j \in (V_\mu(G_H) \times V_M(G_H)) \vee</math></li> <li>▪ <math>A(e_j) \cap V_\mu(G_H) = \{v_k, v_l\}; v_k, v_l \in V_\mu(G_H); v_k \neq v_l; e_j \in (V_\mu(G_H) \times V_\mu(G_H))</math></li> <li>▪ podgrafy grafu <math>G</math>, které jsou mapovány <i>makro-hranami</i>, jsou buď disjunktční s množinou <math>V_\mu(G_H)</math> nebo je jejich průnik s <math>V_\mu(G_H)</math> představován jednoprvkovou či dvouprvkovou množinou vrcholů z <math>V_\mu(G_H)</math></li> </ul>
6	$\forall v_i \in V_M(G_H):$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\Sigma(v_i) \cap E_\mu(G_H) = \emptyset</math></li> <li>▪ podgrafy grafu <math>G</math>, které jsou mapovány <i>makro-vrcholy</i>, jsou disjunktční s množinou hran <math>E_\mu(G_H)</math></li> </ul>
7	$\forall e_j \in E_M(G_H):$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>A(e_j) \cap E_\mu(G_H) = \emptyset</math></li> <li>▪ podgrafy grafu <math>G</math>, které jsou mapovány <i>makro-hranami</i>, jsou disjunktční s množinou hran <math>E_\mu</math> grafu <math>G_H</math></li> </ul>

Tabulka 2 - Algebraická specifikace vlastností makro-segmentů. Zdroj: vlastní

Pro lepší pochopení konstrukce jednotlivých *makro-segmentů* v rámci grafu  $G_H$  (uvedených výše v jejich specifikaci) je uveden obrázek (Obrázek 19). Ten ilustruje jednotlivé typy případů možných průniků podgrafů grafu  $G$ , které jsou mapovány *makro-segmenty* grafu  $G_H$ .



Obrázek 19 - Ilustrace vztahů makro-segmentů. Zdroj: vlastní

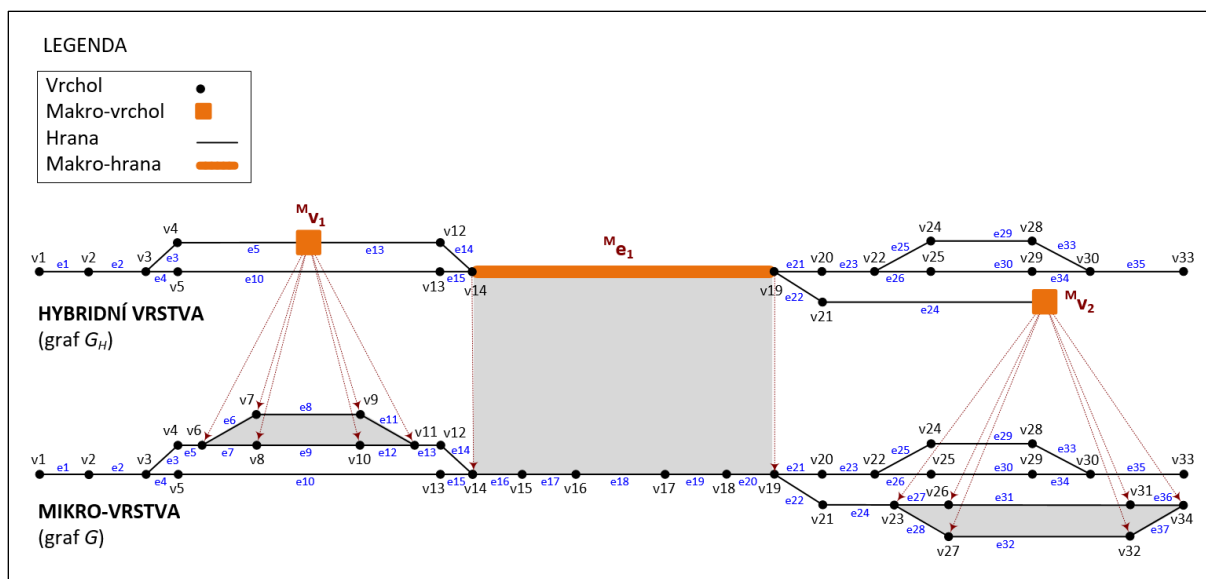
### 6.3.2 Poznámky k vlastnostem hybridního modelu infrastruktury

Z pohledu *hybridního modelu infrastruktury* [34] je potřeba rozlišovat mezi *mikro-vrstvou* (reprezentovanou neorientovaným grafem  $G$ ), obsahující výše představený mikroskopický model infrastruktury, a *hybridní vrstvou* (reprezentovanou neorientovaným grafem  $G_H$ ), kombinující submodely aplikující různou míru abstrakce (Obrázek 20). Uvedená hybridní vrstva vzniká změnou, resp. snížením úrovně podrobnosti u specifikovaných submodelů *mikro-vrstvy*. Zmíněné submodely jsou v hybridní vrstvě nahrazeny tzv. *makro-segmenty*.

Jak již bylo uvedeno, pro reprezentaci železniční infrastruktury je využita datová struktura graf uchovávaná v operační paměti a složená ze dvou typů objektů (vrcholy a hrany). Z pohledu implementace *hybridního modelu infrastruktury* se jedná o dvě různé (souběžně existující) instance této datové struktury:

- graf  $G$  reprezentující prvotní *mikro-vrstvu* a
- graf  $G_H$  představující *hybridní vrstvu* modelu kolejistě.





Obrázek 20 - Dvouúrovňový koncept hybridního modelu infrastruktury. Zdroj: vlastní

Obecně platí, že hrany, resp. vrcholy grafu hybridní vrstvy mohou odrážet jednotlivé hrany, resp. vrcholy mikro-vrstvy, anebo celé agregované oblasti (souvislé podgrafy). Při vytváření těchto agregovaných objektů (tj. *makro-segmentů*) hybridní vrstvy infrastruktury je zapotřebí předem stanovit atributy (odvozením z odpovídajících zapouzdřených objektů *mikro-vrstvy*) důležité zejména pro potřeby výpočtů nad makroskopickými submodely. Tyto atributy jsou detailně popsány v kapitole týkající se makroskopického submodelu provozu (*Kapitola 8.2*).

Při budování hybridního modelu kolejiště se musí vždy vycházet z detailního (mikroskopického) modelu infrastruktury, který obsahuje podrobné informace (atributy) důležité zejména pro mikroskopickou simulaci, jež mohou být pro potřeby makroskopické simulace následně jednoduše agregovány. Opačný postup, kdy je k dispozici pouze agregovaný (makroskopický) model kolejiště, není uvažován, a to zejména z důvodu nepřesného odvozování detailních informací o infrastruktuře pro potřeby mikroskopické simulace. Příkladem by mohly být železniční stanice, o nichž jsou známy pouze koordináty jejich reálných poloh v rámci železniční sítě, ale nejsou k dispozici detailní informace o jejich kolejovém uspořádání, které je nutné například ke zjištění kapacity/propustnosti stanice a podobně.

V rámci metodiky je umožněno vytvářet variantní konfigurace hybridního modelu kolejiště, kde se mohou jeho jednotlivé části v odlišných scénářích simulačního experimentu reprezentovat různou mírou podrobnosti (mikroskopickou či makroskopickou). Pro popis vlastností jednotlivých konfigurací modelu infrastruktury lze využít výše uvedenou algebraickou formalizaci. Tedy například pro uvedený ilustrační případ (*Obrázek 20*), který odráží konkrétní konfiguraci hybridního modelu kolejiště, lze vlastnosti *mikro-vrstvy* a *hybridní vrstvy* vyjádřit takto:

## Příklad 1

$$G = (V, E, \Phi)$$

$$V(G) = \{v_i | i = 1, \dots, 34\}, E(G) = \{e_i | i = 1, \dots, 37\}$$

$$G_H = (V_H, E_H, \Psi, \Sigma, \Lambda)$$

$$V_H(G_H) = V_\mu(G_H) \cup V_M(G_H)$$

$$V_\mu(G_H) \subset V(G)$$

$$V_M(G_H) = \{^M v_1, ^M v_2\}$$

$$\Sigma(^M v_1) = G_1 = (V_1, E_1, \Phi)$$

$$V_1(G_1) = \{v_i | i = 6, \dots, 11\}$$

$$E_1(G_1) = \{e_i, e_j | i = 6, \dots, 9; j = 11, \dots, 12\}$$

$$\Sigma(^M v_2) = G_2 = (V_2, E_2, \Phi)$$

$$V_2(G_2) = \{v_{23}, v_{26}, v_{27}, v_{31}, v_{32}, v_{34}\}$$

$$E_2(G_2) = \{e_{27}, e_{28}, e_{31}, e_{32}, e_{36}, e_{37}\}$$

$$E_H(G_H) = E_\mu(G_H) \cup E_M(G_H)$$

$$E_\mu(G_H) \subset E(G)$$

$$E_M(G_H) = \{^M e_1\}$$

$$^M e_1 = (v_{14}, v_{19}) \in (V_\mu(G_H) \times V_\mu(G_H))$$

$$\Lambda(^M e_1) = G_3 = (V_3, E_3, \Phi)$$

$$V_3(G_3) = \{v_i | i = 14, \dots, 19\}$$

$$E_3(G_3) = \{e_i | i = 16, \dots, 20\}$$

$$\Lambda(^M e_1) \cap V_\mu(G_H) = \{v_{14}, v_{19}\}$$

$$V_\mu(G_H) = [V(G) - (V_1(G_1) \cup V_2(G_2) \cup V_3(G_3))] \cup \{v_{14}, v_{19}\}$$

$$E_\mu(G_H) = E(G) - (E_1(G_1) \cup E_2(G_2) \cup E_3(G_3))$$

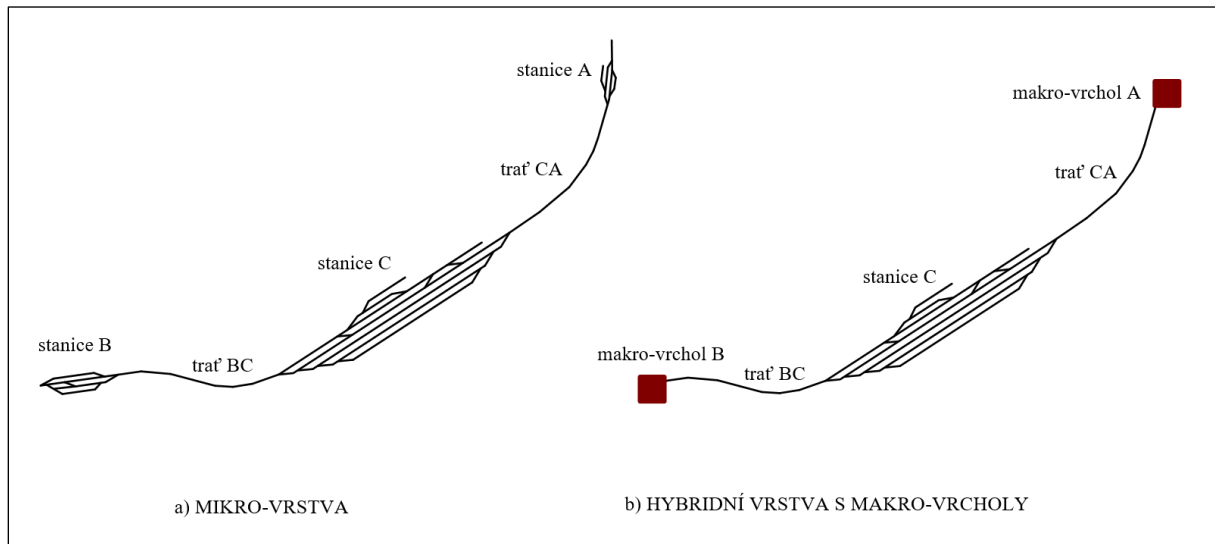
### 6.3.3 Makro-segmenty infrastruktury

Z praktického hlediska jsou v rámci hybridního modelu infrastruktury rozeznávány dva typy makro-segmentů (*makro-vrcholy* a *makro-hrany*). Charakter podgrafu *mikro-vrstvy*, který je kandidátem na zapouzdření do makro-segmentu v hybridní vrstvě, určuje možnosti jeho použití. Jako typický příklad části infrastruktury, kterou je možné reprezentovat na hrubší úrovni granularity, lze uvést kolejště železniční stanice. Ta může být v rámci jednoho experimentu realisticky znázorněna se všemi základními elementy infrastruktury (koleje, nástupiště, návěstidla a podobně) a v rámci jiného experimentu je reprezentována jediným bodem (*makro-vrcholem*). Výhodou konceptu dvouvrstvého přístupu je možnost uplatnění různých konfigurací hybridního modelu bez ztráty či změny reálných topologických, metrických a sklonových poměrů definovaných v mikro-vrstvě.

Z hlediska vizuální prezentace hybridní vrstvy modelu infrastruktury je samozřejmě nutné počítat s vizuálními deformacemi kolejových elementů infrastruktury oproti stavu v mikroskopické vrstvě modelu. Příčinou je odlišné grafické připojení uvedených mikroskopických elementů k *makro-segmentům* v porovnání s původním napojením v rámci *mikro-vrstvy*.

## Konstrukce makro-vrcholu

*Makro-vrchol* odpovídá zapouzdření vybraného souvislého podgrafu mikro-vrstvy do jediného vrcholu vrstvy hybridní. Jak již bylo uvedeno, typickým příkladem je, že makro-vrchol může odrážet infrastrukturu celé železniční stanice (Obrázek 21). Stanici je možné z pohledu cíle zkoumání reprezentovat na hrubší úrovni granularity, a tedy z pohledu experimentátora není důležité její detailní provozní prověřování. Uvedený postup budování hybridního modelu infrastruktury obecně umožňuje vybrat libovolnou oblast mikro-vrstvy (souvislý podgraf) a její následnou agregaci do makro-vrcholu ve vrstvě hybridní.



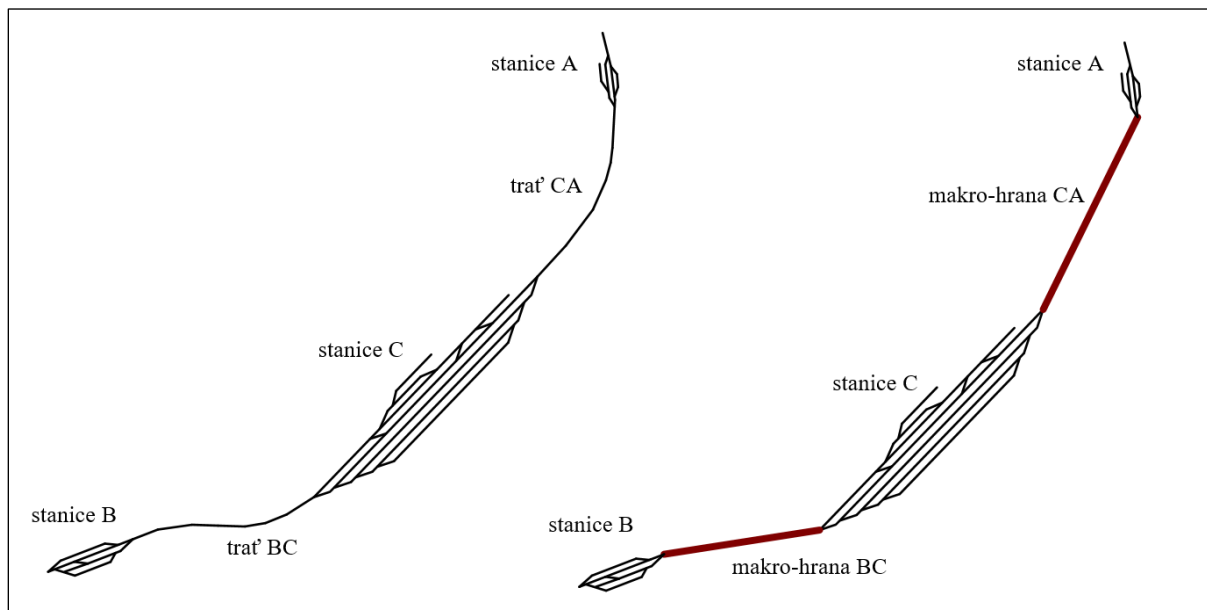
Obrázek 21 - Ilustrace makro-vrcholů. Zdroj:[34]

Grafická poloha vytvořeného makro-vrcholu ve vizuálním schematickém znázornění hybridního modelu kolejisté může například odpovídat centroidu původní vybrané oblasti z mikro-vrstvy, a to může mít za následek vytváření výše uvedených vizuálních deformací. V editoru *TrackEd* je proto umožněno manuálně měnit grafickou polohu nejen vrcholů převzatých z mikro-vrstvy, ale také *makro-vrcholů*.

## Konstrukce makro-hrany

V železniční síti se vyskytují kolejové úseky (v železniční terminologii nazývané širá [23]), které spojují vždy dvě dopravně významná místa. Tyto kolejové úseky, kde nedochází ke křížení tratí nebo sbíhání, resp. rozbíhání tratí do jedné, resp. více tratí, se mohou modelovat na hrubší úrovni granularity. Může se jednat například o jednokolejnou trať mezi dvěma sousedícími stanicemi, která je zpravidla modelována dílčími liniově řazenými hranami v mikro-vrstvě. V rámci simulačních experimentů, které se například zaměřují převážně na provozní zkoumání stanic, nemusí být tyto tratě z pohledu experimentátora nosné, a proto není nutné provádět v této části železniční sítě mikroskopickou simulaci provozu. Z těchto důvodů je důležité v rámci metodiky umožnit zapouzdření těchto dílčích hran (včetně jejich krajních vrcholů) do jediné *makro-hrany* (Obrázek 22) a provádět „nad ní“ pouze makroskopickou simulaci provozu. *Makro-hrana* tedy slouží pro zapouzdření liniového

spojení hran mikro-vrstvy, tj. podgrafu, kde každý vnitřní vrchol je incidentní pouze se dvěma hranami (liniový podgraf).



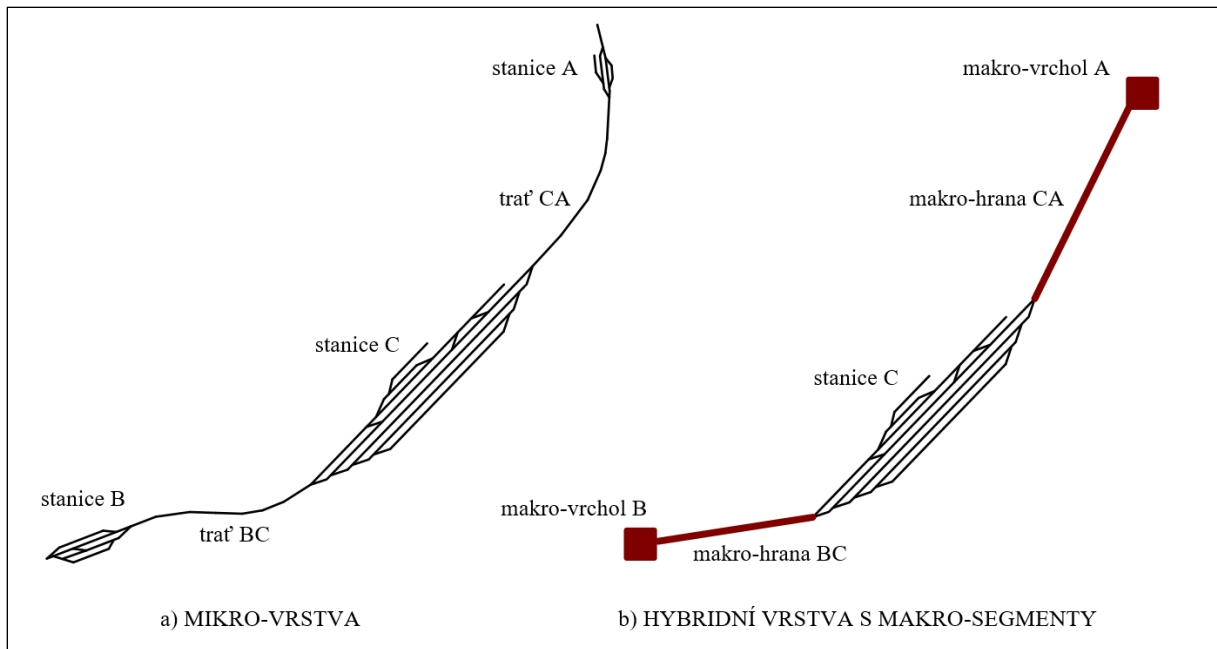
Obrázek 22 - Ilustrace makro-hran. Zdroj:[34]

Jak již bylo zmíněno, jednokolejná trať může být z pohledu *makro-segmentů* modelována jako jedna *makro-hrana*. V případě, kdy se jedná o vícekolejnou trať a zároveň nedochází ke křížení nebo sbíhání či rozbíhání tratí, tak je nutné každý „směr“ modelovat individuálně (tj. každý „směr“ zapouzdřit do jedné *makro-hrany*). V případě vícekolejné trati reprezentované *makro-hranami* je nutné zvládnout grafickou reprezentaci tak, aby v případech shodného počátečního i koncového vrcholu (násobné hrany) nedocházelo k jejich vizuálnímu překrývání.

Obecně lze *makro-hranu* využívat v libovolné oblasti železniční sítě nejen pro tratě, ale jak bylo uvedeno, musí se jednat o zapouzdření liniového podgrafu z *mikro-vrstvy*.

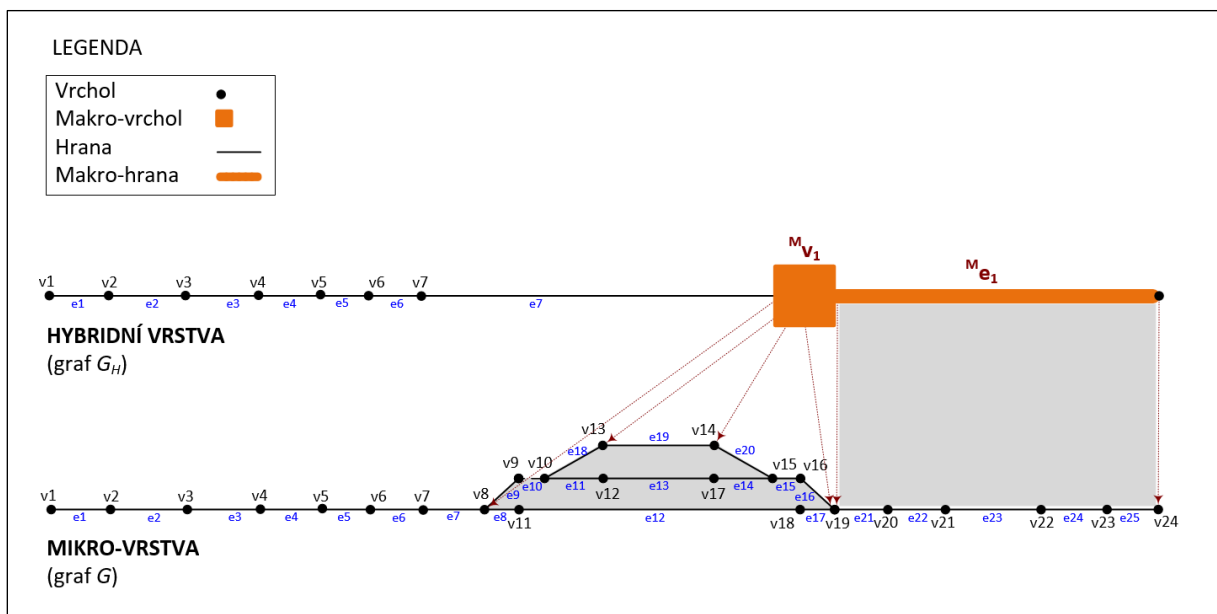
### Kombinace makro-vrcholů a makro-hran

Při vytváření hybridní vrstvy modelu kolejiště je umožněno konstruovat přípustná propojení (vztahy incidence) vždy odlišných typů *makro-segmentů* (Obrázek 23). Je tedy možné provádět propojení *makro-vrcholů* s *makro-hranami*.



Obrázek 23 - Ilustrace výskytů různých typů makro-segmentů. Zdroj:[34]

Jako další příklad lze uvést hybridní model infrastruktury ilustrovaný na obrázku (Obrázek 24) jenž znázorňuje propojení makro-vrcholu s makro-hranou.



Obrázek 24 - Hybridní model infrastruktury s makro-vrcholem incidentním s makro-hranou.

Zdroj: vlastní

V rámci konstrukce hybridního modelu kolejíště se předpokládá statická konfigurace všech makro-segmentů před zahájením simulace, a tedy dynamické změny úrovně podrobnosti nejsou v průběhu simulace podporovány. Výsledný model kolejíště může mít charakter:

- mikroskopického modelu, a to v případě, když neobsahuje žádnou oblast zapouzdřenou do makro-segmentu (tj. výsledná hybridní vrstva je shodná s *mikro-vrstvou*),
- makroskopického modelu, pokud je každá hrana, resp. vrchol *mikro-vrstvy* zapouzdřen do některého z definovaných *makro-segmentů*, nebo
- hybridního modelu, pro který je typické kombinování oblastí uplatňujících odlišné úrovně podrobnosti.

Při vytváření hybridního modelu kolejíště s využíváním *makro-segmentů* zapouzdřujících příslušné podgrafy z *mikro-vrstvy* (s respektováním výše uvedených pravidel), se také musí brát v úvahu vhodné stanovení hranic tohoto zapouzdření s ohledem například na výhybky, křižovatky, nástupiště, izolované obvody a další dopravně významná místa. Obecně je při vytváření hybridního modelu kolejíště vytváření *makro-segmentů* omezeno nejen topologií modelovaného kolejového uspořádání, ale také dalšími technickými systémy (například systémem zabezpečovacích zařízení a podobně).

### Migrace hybridního modelu infrastruktury

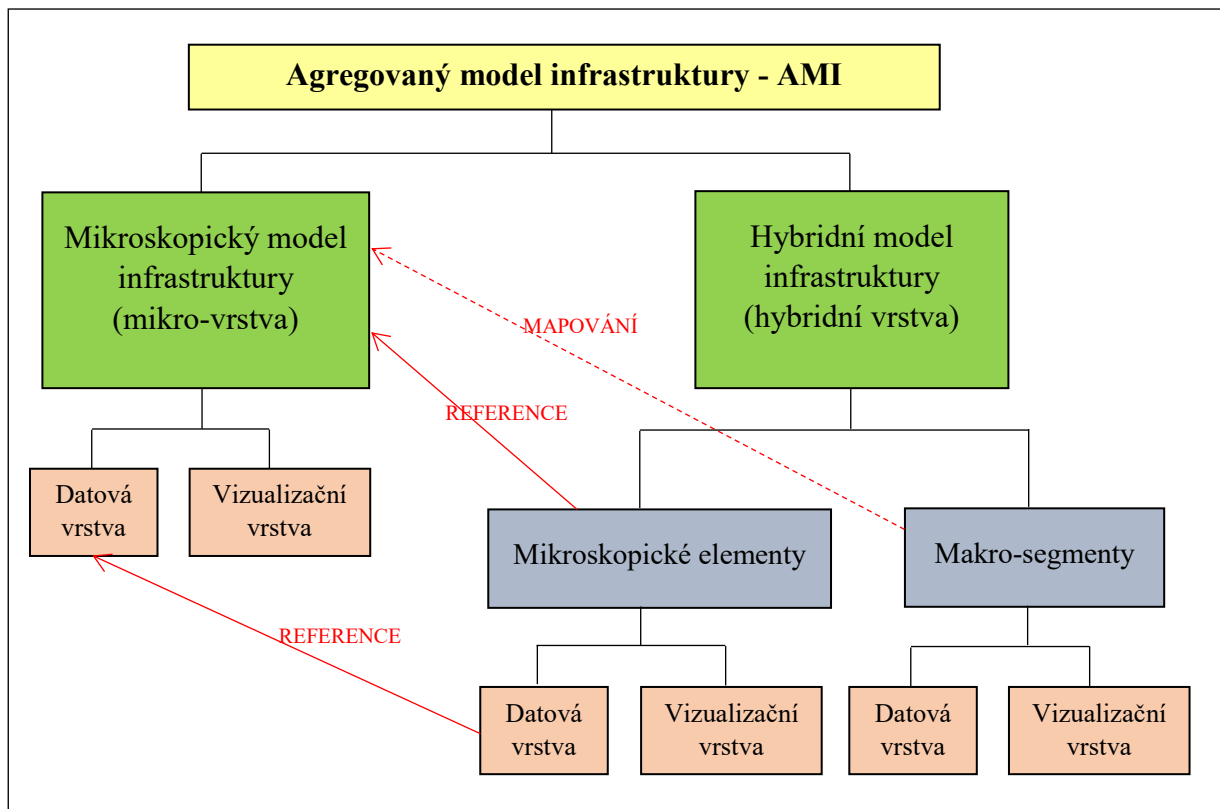
Z pohledu hybridní vrstvy, která kombinuje součásti aplikující různou míru abstrakce, lze každou takto vybudovanou konfiguraci v rámci editoru *TrackEd* uložit do předem připravené šablony ve formátu XML (*Obrázek 25*). V rámci šablony jsou uloženy pouze základní informace (atributy) o makro-segmentech. Šablona tedy určuje, které hrany resp. vrcholy grafu mikro-vrstvy mají být zapouzdřeny do makro-segmentů v rámci hybridního modelu infrastruktury. Samozřejmě pro úspěšné replikování hybridního modelu kolejíště v editoru *TrackEd* je zapotřebí disponovat i odpovídajícím mikroskopickým modelem kolejíště.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<infrastructure>
  <macronodes>
    <macronode y="172.5" x="-486.0" id="Super-Node">
      <nodes>
        <node id="141_2"/>
        <node id="135_1"/>
        <node id="117_1"/>
        <node id="81_1"/>
        <node id="108_3"/>
        <node id="140_3"/>
        <node id="130_2"/>
        <node id="127_3"/>
      </nodes>
    </macronode>
  </macronodes>
  <macroedges>
    <macroedge id="Super-Edge0" start_id="506_1" end_id="472_2">
      <edges>
        <edge id="503_01"/>
        <edge id="206_01"/>
        <edge id="204_01"/>
        <edge id="202_01"/>
        <edge id="201_01"/>
        <edge id="200_01"/>
        <edge id="405_01"/>
        <edge id="400_01"/>
        <edge id="199_01"/>
      </edges>
    </macroedge>
  </macroedges>
</infrastructure>
```

Obrázek 25 - Ukázka šablony hybridního modelu infrastruktury využívaná editorem *TrackEd*.  
Zdroj: vlastní

## Agregovaný model infrastruktury

Z pohledu výše uvedených principů, které vysvětlují budování výsledného *hybridního modelu infrastruktury*, je důležitá také jeho implementace v softwarovém demonstrátoru *TrackEd* (určeném pro vytváření hybridních modelů kolejíště). V editačním nástroji je implementován tzv. *agregovaný model infrastruktury* (zkráceně *AMI*), jehož hierarchická struktura je znázorněna na obrázku (Obrázek 26). Uvedený obrázek ilustruje zejména základní vazby mezi *mikro-vrstvou* a *vrstvou hybridní* a to v rámci jejich reálné implementace.



Obrázek 26 - Agregovaný model infrastruktury. Zdroj: vlastní

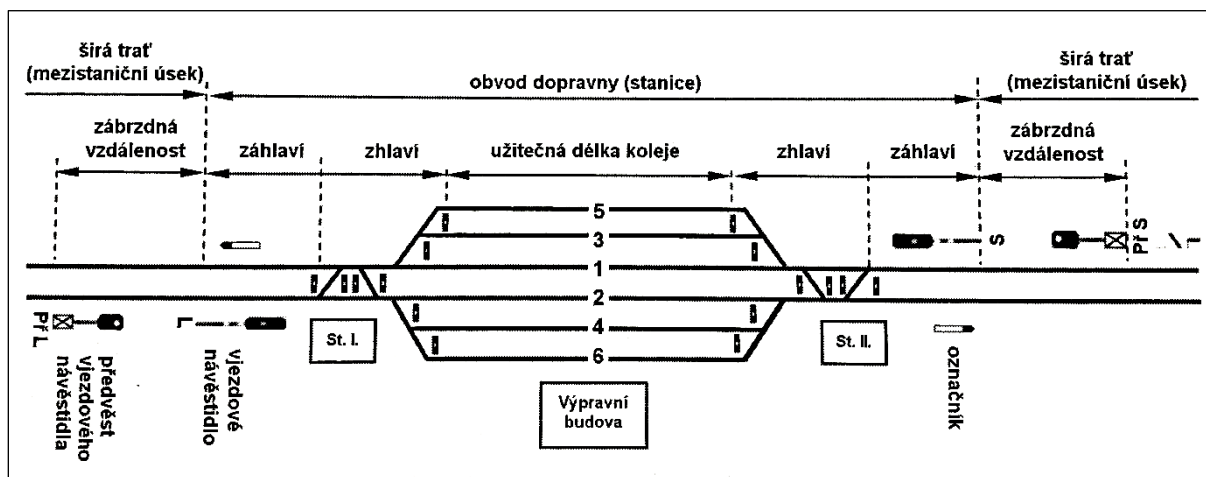
## 7 Návrh hybridního modelu provozu

V důsledku kombinování makro-segmentů s oblastmi sestávajícími z mikroskopických elementů v rámci hybridní vrstvy modelu infrastruktury je nutné aplikovat odlišné modely provozu [35] (uplatňující různou míru abstrakce), které jsou spojeny se sledováním rozdílných provozních ukazatelů – například podrobných jízdních charakteristik jednotlivých vlaků anebo průměrných intenzit dopravních proudů v rámci sledovaných oblastí a podobně.

V rámci unitárního hybridního modelu je tedy potřeba rozlišovat mezi modelem provozu uplatněným pro mikroskopické součásti hybridního modelu (*mikroskopický submodel provozu*), který je založen na sledování podrobných výstupních jízdních charakteristik jednotlivých vlaků a modelem provozu sledujícím například průměrné intenzity dopravních proudů v rámci makroskopických oblastí, tj. makro-segmentů (*makroskopický submodel provozu*).

Konstrukce *makro-segmentu* (odrážejícího definovanou oblast *mikro-vrstvy*) v hybridním modelu kolejiště bere v úvahu nejen kolejové uspořádání, ale musí zohlednit i vhodné stanovení jeho hranic s ohledem na dopravně významná místa. Z pohledu reálného železničního provozu lze v železniční síti rozlišovat dva základní typy oblastí, ve kterých se provoz řídí odlišnými pravidly. Jedná se o oblasti zahrnující:

- železniční stanice a
- tratě (mezistaniční úseky).



Obrázek 27 - Ilustrace obvodu železniční stanice. Zdroj:[23]

Na základě odlišností v železničním provozu v těchto oblastech je při návrhu (a implementaci) hybridního modelu provozu dále uvažováno (Obrázek 27), že *makro-vrchol* typicky slouží k zapouzdření oblasti obsahující obvod železniční stanice a *makro-hrana* typicky odráží části tratí (mezistaničních úseků). Samozřejmě je na designérovi simulačního modelu, zda bude při budování hybridního modelu kolejiště v rámci vymezení



*makro-segmentů* zohledňovat například i signalizační zařízení, zabezpečovací zařízení či jiné železniční subsystémy. Například při zapouzdření obvodu železniční stanice do *makro-vrcholu* může tuto oblast rozšířit i o část tratě (zahrnující kolejiště mezi vjezdovým návěstidlem a předvěstí vjezdového návěstidla). Tato část tratě potom nemusí být zapouzdřena do potenciální *makro-hrany*.

Za předpokladu zapouzdření vymezených oblastí *mikro-vrstvy* modelu kolejiště do *makro-vrcholů* respektive *makro-hran* (v hybridní vrstvě) je definována základní matice přípustných sousedností mezi různými modely provozu uplatněnými „nad“ *makro-vrcholy*, *makro-hranami* a oblastmi, které aplikují mikroskopickou úroveň podrobnosti (Tabulka 3).

		Mikroskopický submodel provozu		Makroskopický submodel provozu	
		Železniční stanice	Mezistaniční úsek	Makro-vrchol	Makro-hrana
Makroskopický submodel provozu	Makro-vrchol	✘	✓	✘	✓
	Makro-hrana	✓	✓	✓	✓

Tabulka 3 - Matice přípustné sousednosti submodelů provozu „nad“ různými oblastmi infrastruktury. Zdroj: vlastní

## 7.1 Koncept mikroskopického submodelu provozu

Mikroskopický model provozu je založen na výpočtu dynamiky jízdy jednotlivých vlaků a jejich interakcí. Výpočet dynamiky jízd vlaků vychází z podrobných informací o infrastruktuře (reálných metrických/topologických a sklonových poměrech) definovaných v příslušné *mikro-vrstvě*. U vlaků jsou zohledňovány trakční charakteristiky hnacích vozidel, odporové, brzdné a další parametry vlaku (například celková hmotnost vlaku, jeho maximální rychlost či výkon hnacího vozidla). Některé další parametry (například odpor vzduchu v tunelu či účinky přechodnice na jízdu vlaku) jsou při výpočtech zanedbány.

Výpočty dynamiky jízd vlaků (prezentované v [48, 63, 65] a [36]) se provádí pomocí numerické integrace s definovaným časovým krokem. Pro každý časový krok jsou přepočítány příslušné stavové proměnné vlaků s respektováním charakteristik vlaků a aktuálně pojížděné infrastruktury. Pohyb vlaků v kolejišti tedy odráží reálné jízdni vlastnosti s respektováním charakteristik vlaků a infrastruktury.

## 7.2 Koncept makroskopického submodelu provozu

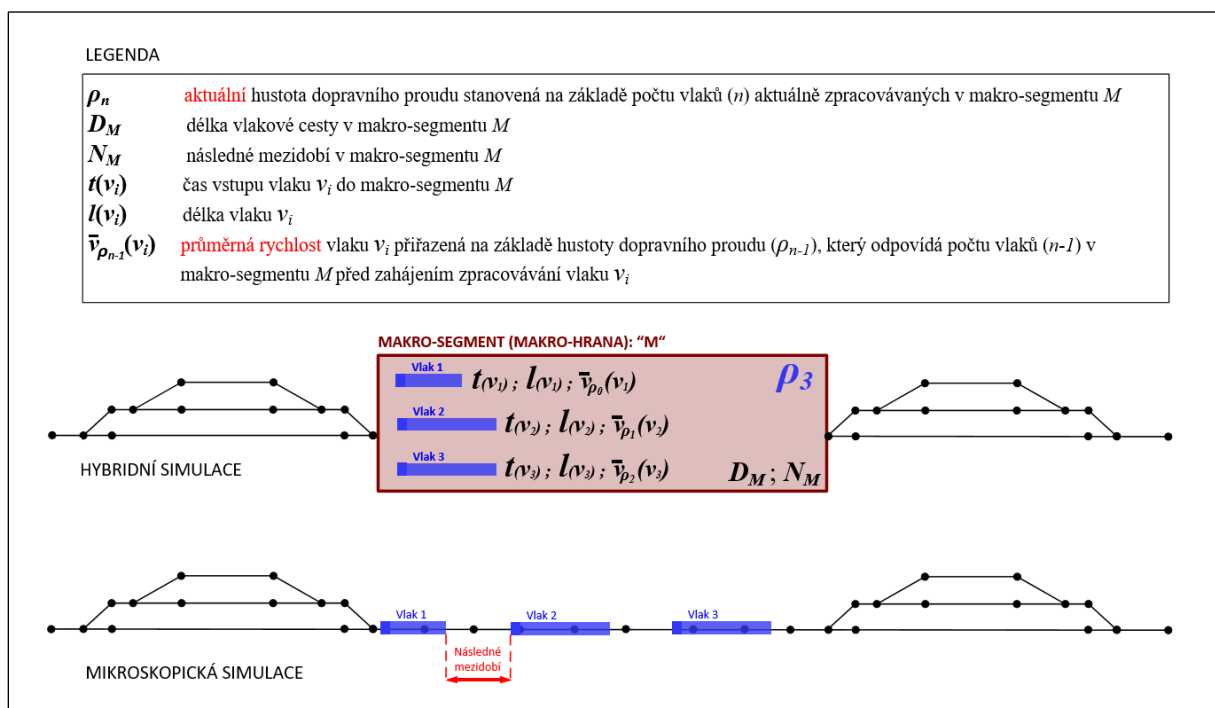
Jak již bylo popisováno, tak z pohledu *makro-segmentů* je potřeba rozlišovat mezi *makro-hranou* (zapouzdřující například část širé tratě bez křížení kolejí) a *makro-vrcholem* (zapouzdřujícím například železniční stanici). Tyto *makro-segmenty* odrážejí dva rozdílné typy oblastí železniční sítě lišící se pohledem na železniční provoz. Z tohoto důvodu bylo vybráno několik konceptů makroskopických modelů provozu založených jednak na analogii s prouděním kapaliny nebo na analogii se soupeřením o sdílené zdroje. Základní odlišnost od

mikroskopického submodelu provozu není jen v aplikované úrovni podrobnosti, ale i v tom, že pohyb vlaku není nutné individuálně sledovat, pokud je aktuálně zpracováván v rámci některého z makroskopických submodelů provozu.

V dalším textu budou pro popis situace, že vlaky jsou zahrnuty v příslušném submodelu provozu, který kooperuje s odpovídajícím submodelem infrastruktury, používána zjednodušená vyjádření, že dané vlaky jsou „uvnitř“ submodelu, nebo že „vstupují do“ submodelu, „opouštějí“ submodel, případně, že jsou „zpracovávány“ v rámci submodelu a podobně.

## Model proudění kapaliny

Železniční provoz modelovaný v rámci *makro-segmentů* lze popsat analogicky jako proudění kapaliny [7], protože stejně tak jako je pohyb částic kapaliny ovlivňován pohybem okolních částic, je i životní cyklus vlaků v rámci *makro-segmentu* ovlivňován ostatními vlaky (Obrázek 28). Tento přístup je převzat z domény simulace provozu na silniční síti. Z důvodů odlišné variability pohybu vlaků po kolejišti, která je určena především vlakovou cestou a definovaným jízdním řádem, jsou některé původní aspekty zanedbány.



Obrázek 28 - Makroskopický submodel provozu (koncept proudění kapalin). Zdroj: vlastní

Uvedený přístup přiděluje každému vlaku, který vstupuje do *makro-segmentu*, průměrnou rychlost  $\bar{v}_\rho$  (určenou z aktuální hustoty dopravního proudu  $\rho$  v *makro-segmentu*). Při určování hustoty dopravního proudu v konkrétním makro-segmentu je zohledňován jednak aktuální počet vlaků v tomto *makro-segmentu* a jednak vlastnosti příslušné části kolejiště (počet izolovaných obvodů, průměrná délka vlakových cest a podobně). Průměrnou rychlost přiřazenou každému vlaku v *makro-segmentu* lze vyjádřit vztahem (1) obsahujícím maximální

povolenou rychlost  $v_{max}$ , aktuální hustotu dopravního proudu  $\rho$  a maximální hustotu tohoto proudu  $\rho_{max}$ , při níž dochází k dopravní kongesci:

$$\bar{v}_\rho = v_{max} \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right) \quad (1)$$

Samozřejmě v časovém okamžiku, kdy vlak *makro-segment* opustí, musí z důvodu zachování plynulosti provozu docházet k přepočítání průměrné rychlosti pro všechny zbývající vlaky, které se v daném *makro-segmentu* aktuálně zpracovávají.

Z pohledu výše diskutovaného makroskopického submodelu provozu lze na základě hustoty dopravního proudu a přidělené průměrné rychlosti vlaku vstupujícímu do *makro-segmentu* určit i simulační čas, kdy daný *makro-segment* může nejdříve opustit (samozřejmě s respektováním uplatněného jízdního řádu). V rámci takto zvoleného přístupu pak není nutné individuální sledování vlaků v průběhu jejich pobytu v *makro-segmentu* [4]. Na druhé straně, v důsledku různých charakteristik *makro-segmentů* a zejména zachování konzistence provozu, je však nutné do výpočtů vhodně zahrnout i údaje o zastavení vlaku dle jízdního řádu na některém ze zapouzdřených mikroskopických elementů (například staniční koleji).

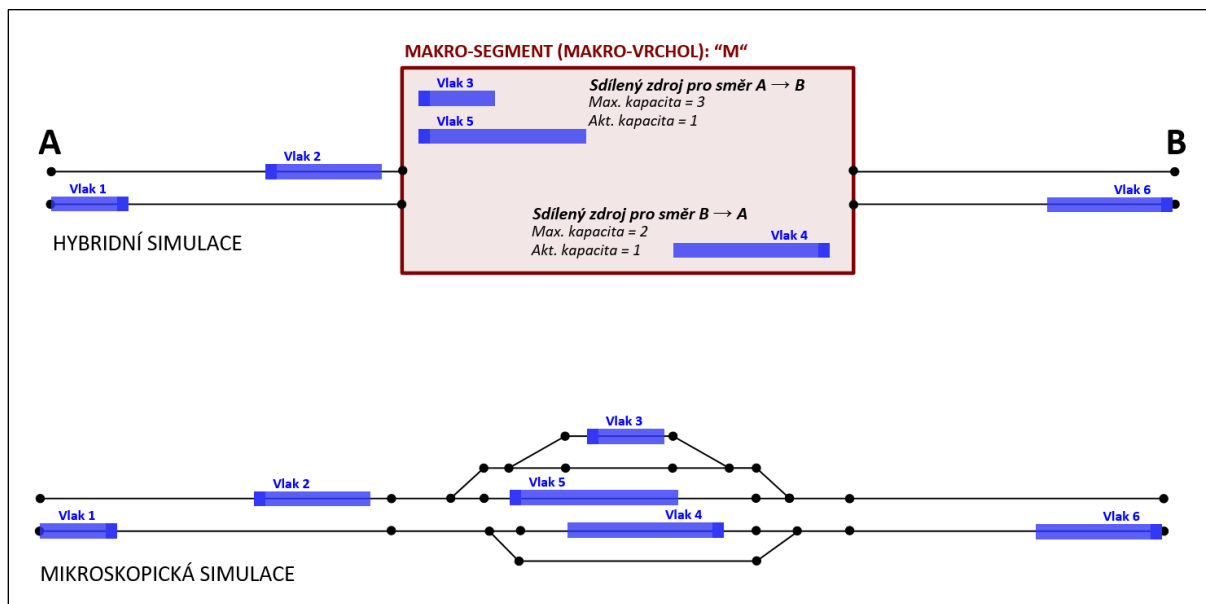
### Model sdílených zdrojů

Odlišným přístupem k modelování provozu „nad“ *makro-segmenty*, je představit si je jako objekty obsahující sdílené zdroje [35], které jsou schopné pojmout (odbavit) pouze určité množství vlaků (*Obrázek 29*). Maximální počet vlaků v rámci *makro-segmentu* může být dán vlastnostmi odpovídající oblasti v *mikro-vrstvě*. V reálném železničním provozu může být omezujícím faktorem (určujícím maximální počet vlaků například v železniční stanici) počet staničních kolejí. Při obsazenosti všech staničních (například nástupištních) kolejí není umožněn vjezd vlaku do stanice, a ten musí čekat na uvolnění některé ze staničních kolejí odjíždějícím vlakem.

Základní odlišností od předchozího konceptu je, že se vlaky aktuálně zpracovávané v rámci *makro-segmentu* navzájem neovlivňují, to znamená, že nemění hustotu dopravního proudu, která by měla přímý vliv na průměrnou rychlost přiřazenou dalšímu vstupujícímu vlaku. Pokud je tedy vlaku umožněno vstoupit do *makro-segmentu* (dle výše definovaných pravidel), je pro něj spočítána doba pobytu v tomto submodelu. Důležitým faktorem je správná časová přírážka v případě, že vlak v rámci příslušné oblasti infrastruktury (zapouzdřené do *makro-segmentu*) zastavuje. Tato přírážka je důsledkem brzdění, resp. akcelerace, která by vznikala v případě, že by se jednalo o oblast s mikroskopickým modelem provozu.

V případě zvoleného modelu provozu pro *makro-segmenty* (uplatňujícího přístup sdílených zdrojů) může docházet k blokování *makro-segmentu* vlaky přijíždějícími pouze z jednoho směru. To by samozřejmě vedlo k nárůstu zpoždění u vlaků v ostatních směrech a k nekonzistenci hybridního modelu provozu vůči čistě mikroskopickému modelu. V reálném provozu, například v rámci železniční stanice, je vždy každému směru přiřazena různá množina staničních kolejí. Pokud jsou zanedbány výjimečné situace reálného provozu, kdy

vlak ve stanici využije i staniční kolej určenou pro jiný směr (na základě rozhodnutí dispečera), lze v rámci každého *makro-segmentu* evidovat skupinu sdílených zdrojů pro každý směr. Výhodou je, že vlaky přijíždějící z různých směrů se budou ovlivňovat jen v případech, kdy železniční stanice využívá pro tyto směry společné staniční koleje.



Obrázek 29 - Makroskopický submodel provozu (koncept soupeření o sdílené zdroje).  
Zdroj:[35]

### Výběr makroskopického submodelu provozu

Pro výše uvedené přístupy k modelování provozu v *makro-segmentu* bylo prvotně usuzováno, že nelze aplikovat jeden model provozu pro oba typy *makro-segmentů*. Očekávaným předpokladem tedy bylo využití modelu sdílených zdrojů pro *makro-vrcholy* a modelu proudění kapalin pro *makro-hrany*. Pro otestování tohoto předpokladu byly v základní podobě implementovány oba koncepty makroskopických modelů provozu, které byly dále podrobeny simulačním experimentům. Výsledky uvedených experimentů však ukázaly, že uvedený předpoklad není vhodné aplikovat (bližší vysvětlení je podáno v podkapitole 11.3).

Simulační experimenty byly zaměřeny na porovnání sumárních jízdních dob jednotlivých vlaků při použití pouze mikroskopického modelu provozu s dosaženými jízdními dobami v rámci různých konfigurací hybridního modelu provozu. Testování bylo zaměřeno na sledování odchylek v sumárních jízdních dobách vlaků, které během svého pohybu po infrastruktuře projížděly i přes *makro-segmenty* vůči výsledkům, kdy se uplatnil na celou železniční síť mikroskopický model provozu. U obou typů *makro-segmentů* bylo vysledováno, že makroskopický model provozu založený na konceptu proudění kapaliny má vliv na jízdní doby vlaků. Důsledkem uplatnění tohoto konceptu modelu provozu (v rámci makroskopických submodelů infrastruktury) docházelo ke zkreslování výstupních rychlostí vlaků na rozhraní *makro-segmentů*, respektive výstupní rychlosti vlaků byly menší, než v případě uplatnění pouze mikroskopického modelu provozu. Naproti tomu u modelu sdílených zdrojů, nebyl zjištěn vliv na výstupní rychlosti vlaků na rozhraní submodelů a

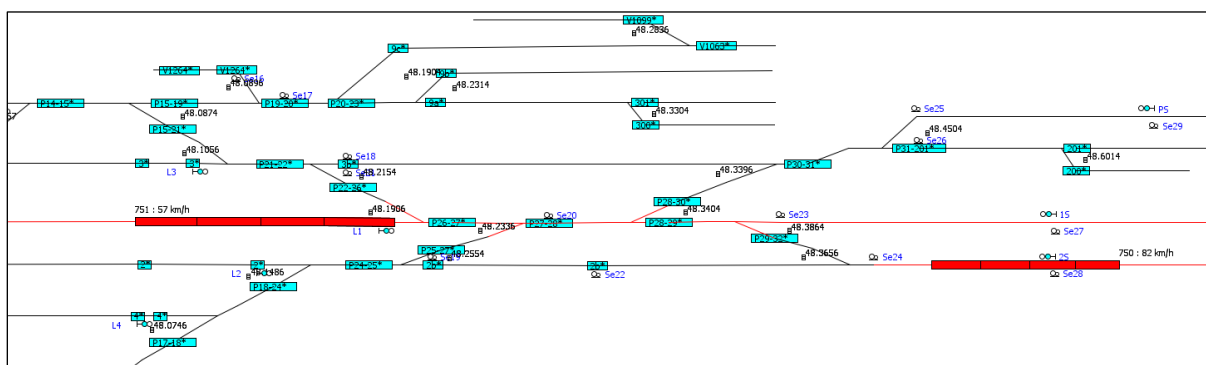
výsledky sumárních jízdních dob vlaků se lišily od výsledků, kdy se aplikoval pouze mikroskopický model provozu, jen minimálně. Na základě těchto zjištění byl tedy vybrán pro oba typy *makro-segmentů* model provozu založený na koncepci soupeření o sdílené zdroje.

## 8 Životní cyklus vlaku v submodelech provozu

Pro demonstraci simulačních experimentů prováděných nad hybridním modelem provozu byl využíván simulační nástroj *SimTrackEd*, který je implementován jako nadstavba původního editačního nástroje *TrackEd*. V rámci nástroje *SimTrackEd* je implementováno agentově orientované simulační jádro (převzaté ze simulačního nástroje *MesoRail* [36]) kombinující synchronní a asynchronní plánování. V rámci této nadstavby je podporována online animace pro snadné a přehledné zobrazení stavu simulace, respektive sledování polohy a rychlosti vlaku v průběhu simulace (především v mikroskopických submodelech). Dále je umožněno i měnit rychlost animace, nebo ji pozastavit dle potřeb uživatele.

### 8.1 Mikroskopický submodel provozu

Jak již bylo uvedeno, v návrhu modelu provozu (realizujícího mikroskopické simulace) je přemístování vlaků založeno na výpočtu dynamiky jejich jízdy pomocí numerické integrace s definovaným časovým krokem. V každém kroku simulačního času jsou tedy pro každý vlak spočítány úkony spojené s jeho dalším pohybem po infrastruktuře (*Obrázek 30*). Pro tyto výpočty se využívají detailní informace o infrastruktuře (*metrické/topologické* a *sklonové poměry*) dostupné v *datové* vrstvě a samozřejmě i technické údaje zadané pro jednotlivé vlakové soupravy (*hmotnosti souprav, délky souprav, maximální rychlosti souprav, trakční charakteristiky hnacích vozidel, odpory hnacích vozidel* a jejich *koeficient zpomalení, výkon hnacího vozidla* a podobně). Samozřejmě simulace pohybu vlaku po kolejišti respektuje daný jízdní řád (který může být narušován náhodnými zpožděními vlaků).



Obrázek 30 - Vizualizace pohybu vlaku v mikroskopickém submodelu. Zdroj: vlastní

Z pohledu pohybu vlakové soupravy v kolejišti se využívají předem předpočítané primární a alternativní vlakové cesty dostupné v *mikro-vrstvě* modelu kolejiště. V rámci modelu infrastruktury se provádí tzv. stavění vlakových cest, které zohledňuje obsazenost příslušných izolovaných obvodů. Jízdy vlaků na trati respektují minimální rozestupy vlaků (následná mezidobí) dle zábrzdě vzdálenosti. Pohyb vlakové soupravy v rámci mikroskopické části hybridního modelu infrastruktury je zjednodušen vůči čistě mikroskopickým simulátorům (například oproti *Villonu*), protože z pohledu simulace železničního provozu nejsou v nástroji *SimTrackEd* uplatňovány například principy některých zabezpečovacích zařízení (příkladem jsou principy automatického hradla nebo automatického bloku). Navzdory této abstrakci však

lze v nástroji *SimTrackEd* dosáhnout výsledků, které jsou srovnatelné s výsledky dosaženými s použitím čistě mikroskopického simulátoru (například *Villonu*).

V rámci mikroskopického submodelu provozu jsou řešeny i některé konfliktní situace, které mohou nastat během pohybu vlaku po infrastruktuře. Tyto konflikty odpovídají situacím, kdy například více vlaků požaduje stejný obslužný zdroj. V rámci konfliktních situací v železniční stanici, například pokud je staniční kolej obsazena jiným vlakem, je vybrána alternativní staniční kolej dle priority v případě její dostupnosti, anebo vlak čeká před železniční stanicí do jejího uvolnění. Podobnou konfliktní situací je i například čekání vlaku v železniční stanici v případech, kdy je navazující jednokolejná trať obsazena protijedoucím vlakem. Při konfliktní situaci na širé trati, například pokud se rychlejší vlak (například rychlík) pohybuje za pomalejším (například nákladním vlakem), je dodržováno následné mezidobí. To může znamenat, že rychlejší vlak je nucen opakovaně brzdit a akcelarovat za tím pomalejším.

Za předpokladu, že je v hybridním modelu umožněno propojovat mikroskopické a makroskopické submodely (infrastruktury i provozu), je možné přidělit i takovou vlakovou cestu, které prochází více odlišnými submodely. Z tohoto důvodu je potřeba v rámci logiky postupného stavění (či posuzování volnosti) příslušných vlakových cest, umožnit postavit i ty její části, které se nachází v *makro-segmentech*. Tedy v případě, že je část vlakové cesty tvořena *makro-segmentem*, je součástí alokace nejen obsazení příslušných izolovaných obvodů v rámci mikroskopické části infrastruktury, ale zejména také rezervace/využití kapacity příslušných *makro-hran* a *makro-vrcholů*.

## 8.2 Makroskopický submodel provozu

Makroskopický model provozu je aplikován na ty aktivity, které souvisí s vlaky jedoucími po části infrastruktury mapované *makro-segmenty* v rámci hybridního modelu infrastruktury. Vlaky nejsou individuálně sledovány po celou dobu jejich „pobytu“ v *makro-segmentu*. Vše potřebné je předpočítáno při vstupu vlaku do makroskopického submodelu, v průběhu jeho „pobytu“ může docházet jen k přepočtu některých *dynamických* atributů, které mohou být ovlivněny aktuální dopravní situací v navazujícím submodelu (mikroskopickém nebo makroskopickém). Příčinou může být například obsazenost příslušné části vlakové cesty na výstupu ze submodelu jiným vlakem a podobně.

Z pohledu vybraného makroskopického submodelu provozu je *makro-segment* chápán jako forma sdíleného zdroje (podobně jak bylo popsáno u konceptů modelů sdílených zdrojů), který je schopný současně/paralelně pojmout (odbavit) pouze určité množství vlaků. Pro tyto účely obsahuje každý *makro-segment* množinu *statických* a *dynamických* atributů (stavových proměnných), které slouží k výpočtům spojených s pobytem vlaku v jeho rámci. Statické atributy jsou stanoveny při vytváření daného *makro-segmentu* (tj. při zapouzdření vybrané oblasti *mikro-vrstvy*) a naopak *dynamické* atributy se mění se změnou dopravního proudu v *makro-segmentu*. U *makro-segmentu* je také samozřejmě nutné mít k dispozici základní charakteristiky popisující vlakové soupravy, které se v dané době v rámci *makro-segmentu* nacházejí/evidují.

### Statické atributy simulační scény

Mezi statické atributy simulační scény, které jsou nastaveny v rámci každého *makro-segmentu*, lze zahrnout:

- množinu všech sdílených zdrojů,
- následné mezidobí a to pro potřeby vyjádření minimálního časového intervalu mezi vlaky,
- minimální vzdálenost (rozestup) mezi vlaky,
- vstupní elementy/body pro vstup do *makro-segmentu*,
- výstupní elementy/body pro opuštění *makro-segmentu*.

### Dynamické atributy simulační scény

Jak již bylo uvedeno, mimo statických atributů jsou v rámci *makro-segmentu* k dispozici i atributy dynamické, které v průběhu simulačního výpočtu mění své hodnoty v závislosti na aktuálním dopravním proudu. Mezi tyto dynamické atributy, které jsou nezbytné pro zachování konzistence železničního provozu na výstupu ze submodelu a jejíž detailní popis fungování bude představen v následující kapitole, lze zahrnout:

- dynamickou množinu *provedených rezervací*, která slouží k předrezervování kapacity *makro-segmentu*,
- *maximální kapacitu makro-segmentu*,
- *aktuální volnou kapacitu makro-segmentu*,
- *aktuální počet vlaků zpracovávaných v makro-segmentu*,
- časové okamžiky pro *zahajování rezervací* volné kapacity následných submodelů pro vlaky, které se budou do těchto submodelů přesouvat,
- časové okamžiky, kdy budou jednotlivé vlaky *opouštět makro-segment* (při znalosti i okamžiků, kdy vlaky vstupovaly do *makro-segmentu*, lze odvodit příslušné doby pobytu vlaků),
- vstupní rychlosti vlaků pro následující submodel.

Maximální kapacita *makro-segmentu* vyjadřuje maximální přípustný počet vlaků, který *makro-segment* pojme. Je stanoven na základě atributů definovaných v příslušné *mikro-vrstvě* a v rámci *makro-vrcholů* respektive *makro-hran* je stanoven odlišně. Jedná se o dynamický atribut, protože může být také závislý na některých charakteristikách vlakových souprav (například na jejich délkách).

### Atributy vlakových souprav

Jelikož v době, kdy se vlak zpracovává v rámci makroskopického submodelu provozu, není individuálně sledován, je nutné si některé jeho atributy (statické nebo dynamické), které jsou nezbytné pro výpočty jeho pobytu v submodelu, uchovat. To nastává v časovém okamžiku, kdy vlak vstupuje do *makro-segmentu*. Mezi tyto základní atributy patří hlavně:

- celková *hmotnost* vlaku,



- *délka vlaku,*
- *koeficient zpomalení vlaku,*
- *koeficient zrychlení vlaku,*
- *maximální konstrukční rychlost vlaku,*
- *průměrná rychlost vlaku v submodelu.*

Z pohledu výše uvedeného koeficientu zrychlení, který se standardně v rámci dostupných charakteristik vlakových souprav neuvádí, lze místo této explicitně definované hodnoty využít i běžně udávanou trakční charakteristiku hnacího vozidla. Poté lze koeficient zrychlení  $a$  v rámci *makro-segmentu* vypočítat dle následujícího vzorce:

$$a = \frac{m \times (F_{\bar{v}} - F_0)}{2} \quad (2)$$

$F_{\bar{v}}$  je hnací síla při průměrné rychlosti v *makro-segmentu* pro daný vlak,  $F_0$  je jeho hnací síla při nulové rychlosti a  $m$  je celková hmotnost vlaku.

V nástroji *SimTrackEd*, který umožňuje online animaci pro zobrazování aktuálního stavu simulace, je oblast simulace provozu v *makro-segmentu* graficky odlišná od oblastí, které uplatňují mikroskopickou úroveň podrobnosti. Tedy vlaky aktuálně zahrnuté do makroskopického submodelu nejsou individuálně animovány, ale je zobrazen jen aktuální stav dynamických atributů daného submodelu.

## 9 Transformace dopravních proudů

Z důvodu koexistence odlišných submodelů provozu v rámci hybridního modelu provozu je nutné vyřešit transformace dopravních toků. To znamená, na rozhraní mikroskopických a makroskopických submodelů (provozu a infrastruktury) je nutné jednoznačně určit charakteristiky železničního provozu za účelem zachování jeho konzistence. Hlavním problémem je ztráta velkého množství informací při přechodu vlaku z mikroskopického do makroskopického submodelu. Důsledkem je absence detailních informací o jednotlivých vlacích, které později přecházejí z makroskopického modelu zpět do modelu mikroskopického. Tyto atributy je potřeba z důvodu mikroskopické simulace jednoznačně odvodit, a to z agregovaných informací (například průměrné rychlosti nebo intenzity dopravního proudu) a stanovit tak aktuální rychlost, obsazenost izolovaných obvodů, intervaly mezi vlaky a podobně. Samozřejmě musí být zvážen aktuální stav provozu (dopravní situace) v příslušném okolí.

Při přechodu vlaku do nebo z makroskopického submodelu je také nutné rozhodnout o proveditelnosti přesunu vzhledem k obsazenosti oblasti, do které se vlak přemísťuje. V případě přesunu na mikroskopický kolejový element je volnost posuzována na základě obsazenosti příslušného izolovaného obvodu. V opačném případě, kdy se vlak přemísťuje do oblasti makroskopické, není tato situace jednoznačná a do značné míry závisí na modelu provozu aplikovaném nad příslušným *makro-segmentem*, tj. může být závislá na hustotě dopravního proudu, volné kapacitě *makro-segmentu* a podobně.

Z pohledu vlaku zpracovávaného v rámci makroskopických oblastí a za účelem zachování konzistence simulovaného provozu je nutné vhodně zvolit mechanismus odvozování jízdních charakteristik vlaku z agregovaných informací. Příkladem může být přiřazení aktuální rychlosti vlaku vstupujícího do mikroskopického submodelu provozu. Tato rychlost může zohledňovat maximální povolenou rychlost v rámci *makro-segmentu* a podobně.

### Zavedení základních symbolů

Pro lepší vysvětlení transformace dopravního proudu na rozhraní submodelů jsou zavedena následující značení (*Tabulka 4*):

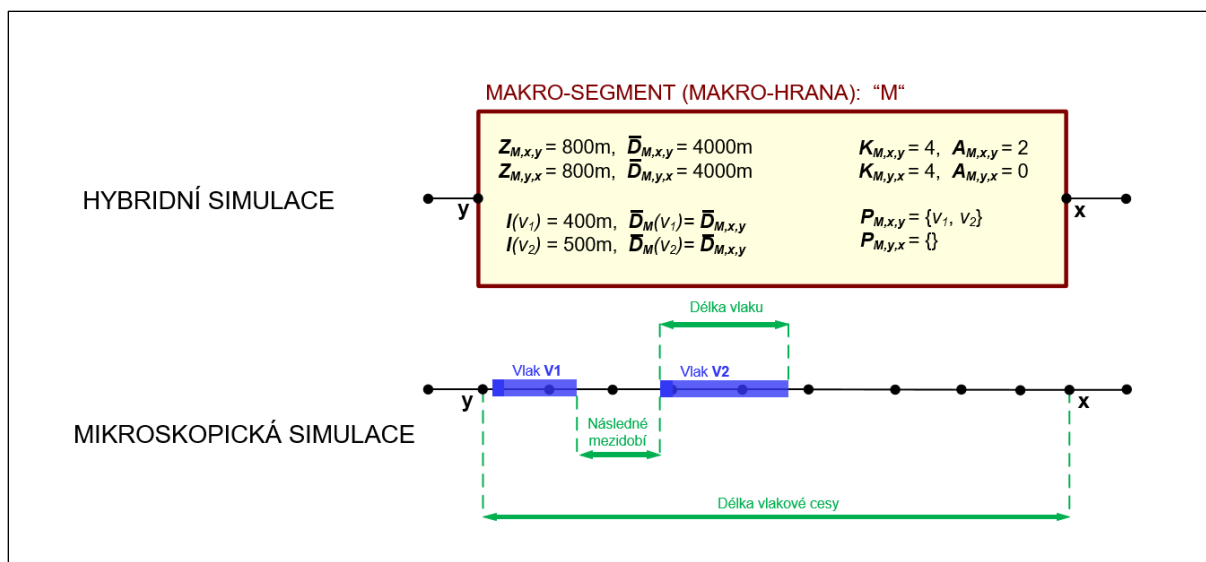
Symbol	Specifikace
$M$	identifikátor submodelu
$S_{i, Od, Do}$	identifikátor $i$ -tého sdíleného v daném směru (tj. ze směru $Od$ do směru $Do$ )
$v_i$	označení $i$ -tého vlaku
$l(v_i)$	délka vlaku $v_i$
$a(v_i)$	koeficient zrychlení vlaku $v_i$
$b(v_i)$	koeficient zpomalení vlaku $v_i$
$\bar{v}_M(v_i)$	průměrná rychlost vlaku $v_i$ v submodelu $M$
$\bar{D}_M(v_i)$	průměrná délka vlakové cesty přidělené vlaku $v_i$ přes submodel $M$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ vyjadřuje průměrnou délku vlakových cest submodelu <math>M</math>, které jsou dostupné pro konkrétní směr pohybu vlaku <math>v_i</math></li> </ul>

Symbol	Specifikace
$T_M(v_i)$	celkový čas potřebný pro průjezd vlaku $v_i$ přes submodel $M$ (tj. doba pobytu)
$^{dec} T_M(v_i)$	časová přírážka v důsledku brzdění vlaku $v_i$ v rámci submodelu $M$
$^{acc} T_M(v_i)$	časová přírážka v důsledku akcelerace vlaku $v_i$ v rámci submodelu $M$
$^{dwl} T_M(v_i)$	doba zastavení vlaku $v_i$ v rámci submodelu $M$ podle jízdního řádu
$^{out} t_{M, Do}(v_i)$	časový okamžik opuštění submodelu $M$ vlakem $v_i$ ve směru $Do$
$^{alloc} t_{M, Do}(v_i)$	časový okamžik žádosti vlaku $v_i$ o přidělení kapacity v submodelu $M$ ve směru $Do$
$K_{M, Od, Do}$	maximální kapacita submodelu $M$ v daném směru (tj. ze směru $Od$ do směru $Do$ ) <ul style="list-style-type: none"> <li>vyjadřuje maximální přípustný počet vlaků, který může odpovídající oblast infrastruktury pojmout</li> </ul>
$R_{M, Od, Do}$	dynamická množina vlaků, pro které jsou aktuálně provedeny rezervace kapacity submodelu $M$ v daném směru
$P_{M, Od, Do}$	dynamická množina vlaků aktuálně zpracovávaných v submodelu $M$ v daném směru
$A_{M, Od, Do}$	aktuální volná kapacita submodelu $M$ v daném směru <ul style="list-style-type: none"> <li><math>A_{M, Od, Do} = K_{M, Od, Do} -  P_{M, Od, Do}  -  R_{M, Od, Do} </math></li> </ul>
$N_{M, Od, Do}$	následné mezidobí v rámci submodelu $M$ v daném směru
$Z_{M, Od, Do}$	minimální rozestup vlaků v rámci submodelu $M$ v daném směru
$\bar{D}_{M, Od, Do}$	průměrná délka vlakových cest přes submodel $M$ v daném směru
$^{navest} D_M$	vzdálenost předvěsti vjezdového návěstidla od výstupního bodu ze submodelu $M$
$^{vjezdnavest} D_M$	vzdálenost vjezdového návěstidla od výstupního bodu ze submodelu $M$
$^{stkolej} D_M$	vzdálenost staniční koleje (sdíleného zdroje) od výstupního bodu ze submodelu $M$
$^{break} D$	vzdálenost mezi výstupním bodem ze submodelu $M$ a místem, kde vlak $v_i$ musí zahájit brzdění v submodelu $M$
$^{sim} t$	aktuální hodnota simulačního času

Tabulka 4 - Specifikace značení statických a dynamických atributů. Zdroj: vlastní

## 9.1 Stanovení maximální kapacity makro-segmentu

Z pohledu modelu provozu aplikovaného „nad“ makro-segmentem je jeho základní charakteristikou *maximální kapacita*  $K_{M,Od,Do}$ . Tato kapacita určuje, kolik vlaků může být ve stejný okamžik maximálně zpracováváno v rámci příslušného submodelu provozu. Pro tyto účely je potřeba zejména v okamžiku vytváření makro-segmentu určit (z dostupných atributů příslušné části mikro-vrstvy modelu kolejistě) maximální přípustný počet vlaků, který může odpovídající oblast infrastruktury pojmout. Dále je vhodné rozdělit tuto kapacitu daného submodelu dle dostupných směrů (převážně pro makro-vrcholy), a to za účelem zamezení provozního blokování makro-segmentu silným provozem pouze v některých směrech. Podobně je stanoven i indikátor určující *aktuální volnou kapacitu*  $A_{M,Od,Do}$ , ten se samozřejmě dynamicky mění s ohledem na aktuální počet vlaků v rámci submodelu. Mezi vlaky, které blokují část kapacity makro-segmentu je potřeba uvažovat nejen ty, které jsou v něm aktuálně zpracovávány, ale také ty, které mají provedené dopředné rezervace kapacity (zohledněné v dynamické množině provedených rezervací  $R_{M,Od,Do}$ ).



Obrázek 31 - Maximální kapacita makro-hrany. Zdroj: vlastní

## Makro-hrana

Protože je *makro-hrana* tvořena pouze jedinou vlakovou cestou modelovanou liniovým souvislým podgrafem, není maximální přípustný počet vlaků v tomto typu *makro-segmentu* závislý na směru, v jakém vlak „projíždí“ daný *makro-segment*. Maximální přípustný počet vlaků v submodelu je tedy stanoven z délky vlakové cesty  $\bar{D}_{M,Od,Do}$ , minimálního rozestupu vlaků  $Z_{M,Od,Do}$  a délky jednotlivých typizovaných vlaků  $l(v_i)$ , které aktuálně maximálně pojme submodel (Obrázek 31). Délka vlakové cesty je stanovena z atributů délek jednotlivých mikroskopických elementů v *mikro-vrstvě* a minimální rozestup může být stanoven explicitně, nebo za použití tabulky zábrzdných vzdáleností anebo z hodnoty následného mezidobí  $N_{M,Od,Do}$ .

Aktuální volná kapacita určuje, zda může vlak vstoupit do submodelu. V případě *makro-hrany* je volná kapacita v aktuálním čase dostupná pouze v jednom směru vlakové cesty (v případech, kdy se některý z jiných vlaků aktuálně zpracovává v submodelu). Pokud je z pohledu dalšího vstupujícího vlaku veškerá kapacita vyčerpána nebo je dostupná pouze v opačném směru, není tomuto vlaku umožněno do submodelu vstoupit a musí čekat před submodelem do uvolnění této kapacity. K navýšení aktuální kapacity submodelu dochází vždy v časovém okamžiku, kdy některý ze zpracovávaných vlaků submodel opustí. Následující algoritmus (*Algoritmus 1*) popisuje zjišťování volné kapacity v případě *makro-hrany*.

Algoritmy uvedené v této práci jsou dokumentovány pomocí formalizovaného popisu jednotlivých funkcí, v jejichž rámci se rozlišuje mezi vstupními argumenty (opatřenými před identifikátorem značkou ↓) a argumenty výstupními (opatřenými značkou ↑). Jednotlivé řádky formalizovaného popisu jsou číslovány a některé navíc rozšířeny o dodatečný komentář.

---

ALGORITMUS 1: Zjištění, zda je volná kapacita *makro-hrany*  $M$  v daném směru ( $Od \rightarrow Do$ ) pro specifikovanou délku vlaku  $l(v_j)$

---

```

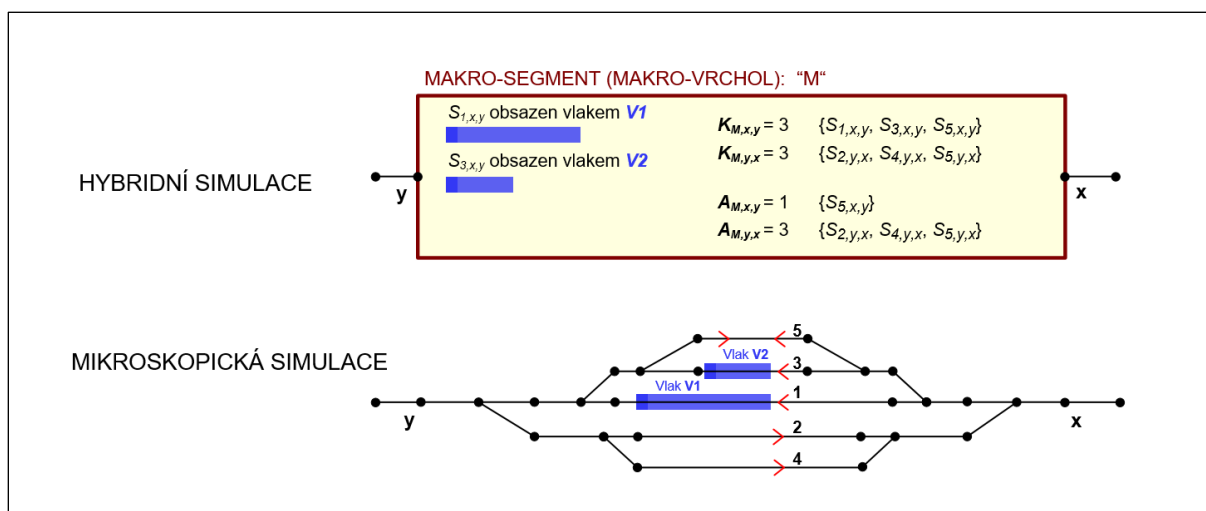
001 function VolnaKapacitaMakroHrany( $\downarrow M$ ,  $\downarrow Od$ ,  $\downarrow Do$ ,  $\downarrow l(v_j)$ ,  $\uparrow free$ )
002    $free \leftarrow \mathbf{false}$ 
003   if ( $A_{M,Od,Do} = 0$ ) then
004     exit
005   end
006    $occD \leftarrow 0$  // aktuálně obsazená délka
007   for each  $v_i \in (P_{M,Od,Do} \cup R_{M,Od,Do})$  do
008      $occD \leftarrow occD + l(v_i) + Z_{M,Od,Do}$ 
009   end
010   if ( $\bar{D}_{M,Od,Do} \geq occD + l(v_j)$ ) then
011      $free \leftarrow \mathbf{true}$ 
012   end
013 end

```

---

### Makro-vrchol

Na druhé straně *makro-vrchol*, jakožto reprezentant typicky zapouzdřující železniční stanice, může odrážet množinu primárních a alternativních vlakových cest, které jsou přidělovány každému směru. Je tedy nutné rozdělit staniční koleje dle všech dostupných směrů (označováno také pojmem *směrová tabulka* sdílených zdrojů), a poté z množství staničních kolejí v daném směru a aktuálního počtu vlaků v submodelu určit možnost vstupu dalšího vlaku do submodelu provozu. Samozřejmě zde záleží na designérovi dopravních simulací, jak budou jednotlivé směry specifikovány. Příkladem může být železniční stanice a její staniční koleje uvedené na obrázku níže (Obrázek 32).



Obrázek 32 - Maximální kapacita makro-vrcholu. Zdroj: vlastní

Z pohledu zjišťování volné kapacity pro vlak vstupující do *makro-vrcholu* je důležité najít alespoň jednu neobsazenou staničních kolej  $i$  (tj. volný zdroj  $S_{i,Od,Do}$ ), která je v dané specifikaci určena jako použitelná pro stejný směr jako je směr pohybu vlaku přes daný submodel. K navýšení aktuální kapacity dochází (stejně jako v případě *makro-hran*) po opuštění submodelu některým ze zpracovávaných vlaků. Následující algoritmus (*Algoritmus 2*) popisuje přidělování volného zdroje danému vlaku v případě *makro-vrcholu*.

---

ALGORITMUS 2: Přidělení volného zdroje *makro-vrcholu*  $M$  v daném směru ( $Od \rightarrow Do$ )

---

```

001 function PrideleniVolnehoZdrojeMakroVrcholu( $\downarrow M, \downarrow Od, \downarrow Do, \uparrow st$ )
002    $st \leftarrow null$ 
003   for each  $S_{i,Od,Do} \in Q$  do                                // množina sdružující prvky obsluhy v submodelu  $M$ 
004     if  $vacant(S_{i,Od,Do})$  then                                // test prázdnosti sdíleného zdroje
005        $st \leftarrow S_{i,Od,Do}$                                 // dostupná staniční kolej (sdílený zdroj)
006       exit
007     end
008   end
009 end

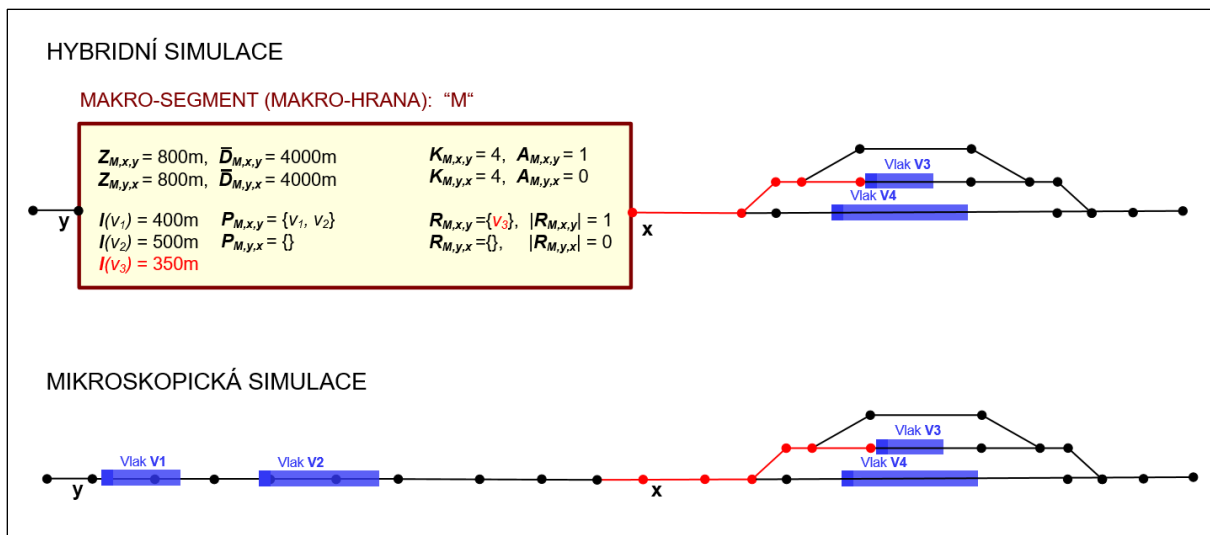
```

---

Z pohledu definování kapacity *makro-vrcholu* pomocí počtů staničních kolejí (tj. sdílených zdrojů) je samozřejmě možné zohlednit využití jedné staniční koleje více vlaky současně, tak jako tomu může být v reálné železniční stanici. V tomto případě je zapotřebí blokovat pouze část staniční koleje (sdíleného zdroje) a to pro daný směr. Tato část blokace staniční koleje může být určena například rozdílem délky staniční koleje a délky vlaku. Pro potřeby prezentované případové studie však tato funkcionality nebyla využita.

## 9.2 Předběžná rezervace kapacity makro-segmentu

Vzhledem k charakteru železničního provozu je nutné počítat s možností obsazení *makro-segmentu* daným vlakem (prostřednictvím dynamického „rezervačního“ atributu  $R_{M,Od,Do}$ ) dříve, než skutečně do *makro-segmentu* vstoupí. Tato *předběžná rezervace* části provozní kapacity *makro-segmentu* musí být samozřejmě proveditelná nejen z mikroskopického submodelu provozu (sousedícího s *makro-segmentem*), ale potenciálně také ze submodelu makroskopického, a to zejména pokud se připouští sousednost *makro-segmentů* v rámci hybridního modelu kolejiště.



Obrázek 33 - Rezervace kapacity makro-vrcholu. Zdroj: vlastní

Předběžná rezervace kapacity v případě *makro-hrany* je samozřejmě závislá na její aktuální volné kapacitě  $A_{M,Od,Do}$ . Pokud je pro žádající vlak vyhodnoceno, že je v rámci submodelu provozu pro danou *makro-hranu* volná kapacita, tak je požadavek přidán do rezervačního atributu  $R_{M,Od,Do}$  a aktuální volná kapacita submodelu je ponížena (Obrázek 33). V případě *makro-vrcholu* je navíc pro žádající vlak přidělena/zarezervována  $i$ -tá staniční kolej (tj. sdílený zdroj  $S_{i,Od,Do}$ ), tak aby byla blokována pro v budoucnu další žádající vlak. V rámci zjišťování dostupnosti volné kapacity *makro-segmentu* (*makro-hran* i *makro-vrcholů*) je tedy přihlédnuto i k počtu plánovaných vstupujících vlaků dostupných v množině provedených rezervací:

$$A_{M,Od,Do} = K_{M,Od,Do} - |P_{M,Od,Do}| - |R_{M,Od,Do}| \quad (3)$$

Pokud se vlak  $v_i$  zpracovává v daném mikroskopickém submodelu provozu a jeho životní cyklus bude dále pokračovat v přilehlém submodelu (pracujícím „nad“ příslušným *makro-segmentem*), je potřebné, aby vlak  $v_i$  ve vhodném časovém okamžiku (simulačního času) požádal o rezervaci kapacity daného následného makroskopického submodelu provozu.

Je-li vlak  $v_i$  aktuálně zpracováván v rámci daného makroskopického submodelu provozu  $M$ , a dále bude pokračovat do následného submodelu provozu  $M'$  (makroskopického nebo mikroskopického), pak je žádost o rezervaci kapacity  $M'$  prováděna v předpočítaném okamžiku simulačního času  $^{alloc}t_{M,Do}(v_i)$ . Okamžik  $^{alloc}t_{M,Do}(v_i)$  je určen při vstupu vlaku  $v_i$  do submodelu  $M$  v jistém okamžiku simulačního času  $^{sim}t$  ( $^{sim}t \leq ^{alloc}t_{M,Do}(v_i)$ ). Zmíněná problematika bude dále dokumentována v následující podkapitole.

### 9.3 Rezervace kapacit v následných submodelech

Vzhledem ke koexistenci různých submodelů v rámci hybridního modelu kolejiště musí být v *makro-segmentech* (a v jim příslušejících makroskopických submodelech provozu) potenciálně řešen problém týkající se obsazení vlakové cesty v rámci následného submodelu

(mikroskopického nebo makroskopického). To tedy znamená, že i když je vlak aktuálně fixován v daném *makro-segmentu*  $M$ , musí se pro něj s dostatečným předstihem zabezpečit kapacita v dalším (následném) submodelu  $M'$ , do kterého bude následně vstupovat (může se například jednat o situaci, kdy se vlak bude chtít přesunovat z *makro-hrany* do sousedícího mikroskopického submodelu železniční stanice a podobně). V důsledku toho se při vstupech vlaků do *makro-segmentů* určují i hodnoty okamžiků simulačního času (časových razítek  $^{alloc}t_{M,Do}(v_i)$ ), kdy se může nejdříve zahájit obsazování/stavění příslušných vlakových cest anebo rezervovat kapacita v následných submodelech pro daný vlak  $v_i$ . Samozřejmě pokud je následný submodel  $M'$  v příslušném okamžiku obsazen, je nutné čekat, což dynamicky ovlivní dobu pobytu vlaku v aktuálním submodelu  $T_M(v_i)$ , tj. i hodnotu okamžiku simulačního času  $^{out}t_{M,Do}(v_i)$ , kdy bude vlak  $v_i$  tento submodel  $M$  opouštět.

### Makro-hrana

V případě *makro-hrany* (a příslušného submodelu provozu  $M$ ) je stanovení časového okamžiku pro žádost o přidělení kapacity v následném submodelu  $M'$  závislá na zapouzdřené části tratě. Tedy, zda odráží část *mikro-vrstvy* s předvěstí vjezdového návěstidla nebo nikoli.

V případě, že zapouzdřená oblast železniční infrastruktury neobsahuje předvěst vjezdového návěstidla, je časový okamžik pro zahájení obsazení následného submodelu  $M'$  závislá zejména na hodnotě minimálního rozestupu vlaků  $Z_{M,Od,Do}$  a na aktuální hodnotě simulačního času  $^{sim}t$ . Vlak bude žádat o přidělení vlakové cesty v okamžiku, kdy jeho poloha vzhledem k výstupnímu bodu ze submodelu  $M$  odpovídá minimálnímu požadovanému rozestupu vlaků, což lze spočítat ze vztahu:

$$^{alloc}t_{M,Do}(v_i) = ^{sim}t + \frac{\bar{D}_M(v_i) - Z_{M,Od,Do}}{\bar{v}_M(v_i)} \quad (4)$$

Pokud je situace opačná a předvěst vjezdového návěstidla je zahrnuta ve správném směru s pohybem vlaku v submodelu  $M$ , je pomocí její vzdálenosti od výstupního bodu ze submodelu  $M$  ( $^{navest}D_M$ ) možné analogicky spočítat příslušný časový okamžik následovně:

$$^{alloc}t_{M,Do}(v_i) = ^{sim}t + \frac{\bar{D}_M(v_i) - ^{navest}D_M}{\bar{v}_M(v_i)} \quad (5)$$

Samozřejmě pro oba případy je nutné výsledek porovnat s maximální vypočítanou hodnotou časových razítek (určující okamžik zahájení příslušných opatření v následném submodelu) pro všechny vlaky již aktuálně zpracovávané v rámci submodelu  $M$ . Důvodem je, že *makro-hrana* disponuje pouze jednou vlakovou cestou, na které se vlaky nemohou předjíždět (uplatňují FIFO režim) a zároveň musí dodržovat minimální rozestupy. Tedy například v situaci rychlejšího vlaku  $v_i$  může dojít k výpočtu hodnoty časového okamžiku odpovídající žádosti o kapacitu následného submodelu, při které vlak  $v_i$  nesplňuje minimální rozestup s vlakem  $v_j$ , který žadal předním ( $^{alloc}t_{M,Do}(v_i) < ^{alloc}t_{M,Do}(v_j) + N_{M,Od,Do}$ ). V těchto situacích je



potřeba přepočítat hodnotu časového okamžiku pro žádost o rezervaci kapacity následného submodelu pro vlak  $v_i$  následovně:

$$alloc_{t_{M,Do}}(v_i) = alloc_{t_{M,Do}}(v_j) + N_{M,Od,Do} \quad (6)$$

Tento přístup zaručí, že vlaky budou daný submodel opouštět ve správných minimálních časových rozestupech. Obdobně, pokud vlaku nebude umožněno rezervovat kapacitu v následném submodelu  $M'$  v okamžiku simulačního času  $alloc_{t_{M,Do}}(v_i)$ , například z důvodu nedostupné kapacity v následujícím submodelu  $M'$  v danou chvíli, je samozřejmě také potřeba dodržet mezi vlaky minimální rozestup. To znamená, že mohou být následně ovlivněny nejen časová razítka určující žádost o obsazení následného submodelu ( $M'$ ), ale i doby pobytu těch vlaků, které do *makro-hrany* (a příslušného submodelu provozu  $M$ ) vstoupily za daným vlakem.

### Makro-vrchol

V případě *makro-vrcholu*, který typicky zapouzdřuje železniční stanici, je potřeba rozlišovat situace, kdy vlak železniční stanicí pouze projíždí nebo v ní přímo (dle jízdního řádu) zastavuje.

V prvním případě je hodnota časového okamžiku pro žádost o obsazení následného submodelu spjata s polohou vjezdového návěstidla. Tedy obdobně jako v případě *makro-hrany*, kde  $vjezdnavest D_M$  vyjadřuje vzdálenost vjezdového návěstidla (zapouzdřeného v submodelu  $M$ ) od výstupního bodu ze submodelu  $M$ , je uvedený časový okamžik určen jako:

$$alloc_{t_{M,Do}}(v_i) = sim_t + \frac{\bar{D}_M(v_i) - vjezdnavest D_M}{\bar{v}_M(v_i)} \quad (7)$$

V druhém případě, kde vlak v *makro-vrcholu* dle jízdního řádu zastavuje, je hodnota simulačního času (odpovídající realizaci požadavku na obsazení následného submodelu) závislá na časovém okamžiku, kdy by vlak odjížděl od staniční koleje. Pro výpočet je použita vzdálenost  $stkolej D_M$  přidělené staniční koleje (sdíleného zdroje) od výstupního bodu ze submodelu  $M$ :

$$alloc_{t_{M,Do}}(v_i) = sim_t + \frac{\bar{D}_M(v_i) - stkolej D_M}{\bar{v}_M(v_i)} + dec T_M(v_i) + dwl T_M(v_i) \quad (8)$$

Doba  $dwl T_M(v_i)$  vyjadřuje dobu zastavení vlaku u staniční koleje dle jízdního řádu a  $dec T_M(v_i)$  je časová přírážka z důvodu brzdění vlaku v submodelu  $M$ , která bude blíže popsána v následující podkapitole.

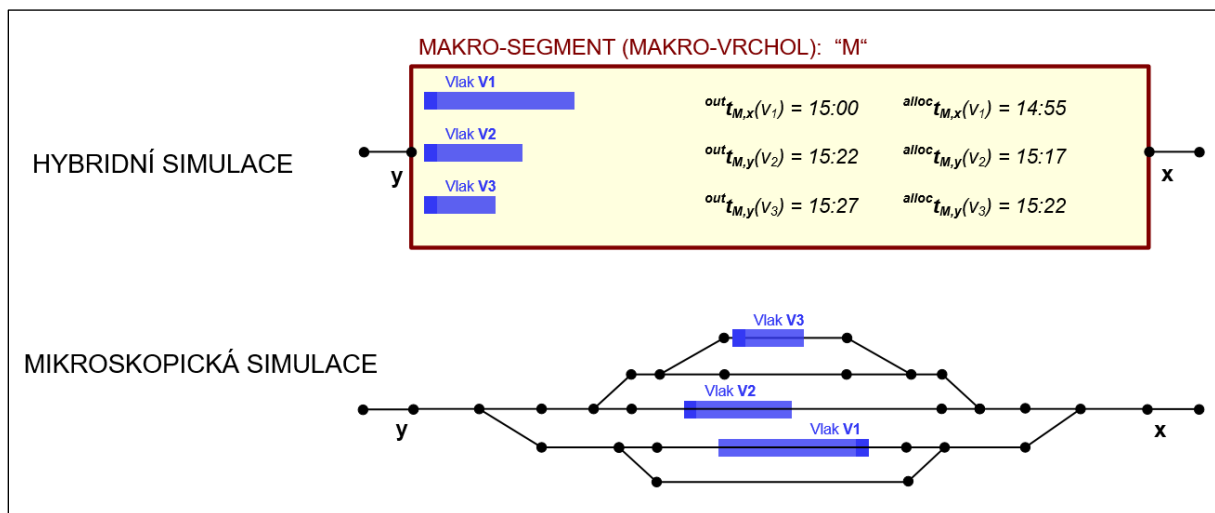
Pokud vlaku není umožněno rezervovat kapacitu v následném submodelu  $M'$  ve stanovené hodnotě simulačního času  $^{alloc}t_{M,Do}(v_i)$ , není potřeba přepočítávat hodnoty časových okamžiků pro zahájení obsazení následného submodelu ani doby pobytu u všech ostatních vlaků, které do *makro-vrcholu* vstoupily až za ním. V rámci *makro-vrcholu* jsou totiž sdílené zdroje řazeny paralelně na rozdíl od *makro-hrany*, kde jsou řazeny sekvečně.

#### 9.4 Stanovení očekávané doby pobytu vlaku v makroskopickém submodelu provozu

Pokud se blíže rozebere výpočet okamžiku simulačního času  $^{out}t_{M,Do}(v_i)$ , kdy vlak daný *makro-segment* opustí (Obrázek 34), pak se to děje také vždy výhradně při jeho vstupu do příslušného submodelu provozu ( $M$ ).

Obecně se pro určení doby pobytu vlaku zohledňuje:

- průměrná délka vlakových cest,
- průměrná rychlost vlaku a
- příslušná časová přírážka (například z důvodu zastavení vlaku v železniční stanici nebo jeho brzdění před železniční stanicí a podobně).



Obrázek 34 - Stanovení okamžiků výstupů vlaků z makro-segmentu. Zdroj: vlastní

Jelikož vlak nemůže opustit daný *makro-segment* ještě předtím, než má alokovanou vlakovou cestu respektive rezervovanou kapacitu v následujícím submodelu, platí mezi časem nejdříve možného opuštění submodelu  $M$  a časem nejdříve možné žádosti o obsazení následného submodelu  $M'$  (směr *Do* vůči submodelu  $M$ ) vztah:

$$^{out}t_{M,Do}(v_i) > ^{alloc}t_{M,Do}(v_i) \quad (9)$$

## Makro-hrana

Čas nejdříve možného opuštění submodelu  $M$  (*makro-hrany*)  $i$ -tým vlakem se vypočítá dle vzorce, který zahrnuje průměrnou rychlost vlaku a průměrnou délku vlakové cesty přiřazenou vlaku  $v_i$  v submodelu  $M$ . Tedy dle vzorce:

$${}^{out}t_{M,Do}(v_i) = {}^{sim}t + \frac{\bar{D}_M(v_i)}{\bar{v}_M(v_i)} \quad (10)$$

Samozřejmě, pokud vlak musí brzdit před železniční stanicí v části, kterou odráží *makro-hrana*, je zapotřebí určit nejen výstupní rychlost vlaku při opuštění submodelu, ale zejména správnou časovou přírážku v důsledku jeho brzdění z průměrné rychlosti definované v submodelu  $M$ . Tato časová přírážka je závislá na dráze, kterou ujede při brzdění, a odpovídá času, který přitom ztratí oproti režimu, kdy se pohybuje průměrnou rychlostí.

$${}^{out}t_{M,Do}(v_i) = {}^{sim}t + \frac{\bar{D}_M(v_i)}{\bar{v}_M(v_i)} + {}^{dec}T_M(v_i) \quad (11)$$

Uvedený výpočet časové přírážky  ${}^{dec}T_M(v_i)$  v důsledku brzdění v rámci submodelu provozu „nad“ *makro-hranou* je dokumentován pomocí formalizovaného postupu uvedeného v *Algoritmu 3*. Výpočet je založený na principu rovnoměrně zpomaleného pohybu s využitím parametru zpomalení vlaku  $b(v_i)$  a parametru  ${}^{break}D$ , který odpovídá vzdálenosti (dráze) mezi výstupním bodem ze submodelu  $M$  a místem (v submodelu  $M$ ), kde vlak musí zahájit brzdění.

---

ALGORITMUS 3: Časová přírážka k době jízdy vlaku v důsledku jeho brzdění v rámci *makro-hrany*

---

```
001 function CasovaPrirazkaBrzdenim( $\downarrow \bar{v}_M(v_i)$ ,  $\downarrow b(v_i)$ ,  $\downarrow {}^{break}D$ ,  $\uparrow {}^{dec}T_M(v_i)$ )
002    ${}^{dec}T_M(v_i) \leftarrow 0$ 
003    ${}^{stop}T \leftarrow \bar{v}_M(v_i) / b(v_i)$  // doba potřebná pro zastavení
004    ${}^{stop}D \leftarrow \bar{v}_M(v_i) \times {}^{stop}T - \frac{1}{2} \times b(v_i) \times {}^{stop}T^2$  // dráha kterou ujede než zastaví
005    ${}^{full}T \leftarrow {}^{break}D / \bar{v}_M(v_i)$  // doba jízdy při konstantní rychlosti na dané dráze
006    ${}^{break}T \leftarrow ({}^{stop}T / {}^{stop}D) \times {}^{break}D$  // doba, za kterou vlak brzdí na dané dráze
007    ${}^{dec}T_M(v_i) \leftarrow \text{abs}({}^{break}T - {}^{full}T)$ 
008 end
```

---

Při výpočtu hodnoty okamžiku simulačního času (a s tím spojené doby pobytu) pro opuštění submodelu provozu „nad“ *makro-hranou* je však potřeba zohlednit i fakt, že vlaky se řadí v režimu FIFO, tzn. nemůže docházet k jejich předjíždění, jako je tomu u submodelů provozu „nad“ *makro-vrcholy* odrážejícími například železniční stanice. Z pohledu výpočtu těchto časových razítek jednotlivých vlaků a režimu FIFO je důležité zohlednit i minimální časové rozestupy mezi vlaky.

## Makro-vrchol

V případě submodelu provozu „nad“ *makro-vrcholem* je vzorec pro výpočet časového okamžiku pro opuštění submodelu (uvedený výše) rozšířen o časové přírážky v případech, že vlak musí v rámci *makro-vrcholu* dle jízdního řádu zastavit. Správný výpočet časové přírážky je důležitý zejména pro realistické určování celkových jízdních dob (zahrnujících i akcelerační a decelerační fáze jízdy). V případech, kdy  $i$ -tý vlak dle jízdního řádu v rámci submodelu zastavuje, lze časovou přírážku vypočítat jako:

$${}^{dwl}T_M(v_i) + {}^{dec}T_M(v_i) + {}^{acc}T_M(v_i) \quad (12)$$

přičemž interpretace symbolů je následující:

- ${}^{dwl}T_M(v_i)$  vyjadřuje samotnou dobu stání  $i$ -tého vlaku u nástupiště ve stanici (*makro-segmentu*  $M$ ) dle jízdního řádu,
- ${}^{dec}T_M(v_i)$  představuje časovou přírážku v důsledku brzdění  $i$ -tého vlaku z průměrné rychlosti (definované v submodelu  $M$ ) do jeho úplného zastavení a
- ${}^{acc}T_M(v_i)$  představuje časovou přírážku v důsledku akcelerace  $i$ -tého vlaku z nulové rychlosti na průměrnou rychlost (v submodelu  $M$ ).

---

ALGORITMUS 4: Časová přírážka k době jízdy vlaku v důsledku jeho brzdění  
v *makro-vrcholu*

---

```
001 function CasovaPrirazkaBrzdenim( $\downarrow \bar{v}_M(v_i)$ ,  $\downarrow b(v_i)$ ,  $\uparrow {}^{dec}T_M(v_i)$ )
002    ${}^{dec}T_M(v_i) \leftarrow 0$ 
003    ${}^{stop}T \leftarrow \bar{v}_M(v_i) / b(v_i)$  // doba potřebná pro zastavení
004    ${}^{stop}D \leftarrow \bar{v}_M(v_i) \times {}^{stop}T - \frac{1}{2} \times b(v_i) \times {}^{stop}T^2$  // dráha kterou ujede než zastaví
005    ${}^{full}T \leftarrow {}^{stop}D / \bar{v}_M(v_i)$  // doba jízdy při konstatní rychlosti
006    ${}^{dec}T_M(v_i) \leftarrow abs({}^{stop}T - {}^{full}T)$ 
007 end
```

---

---

ALGORITMUS 5: Časová přírážka k době jízdy vlaku v důsledku jeho akcelerace  
v *makro-vrcholu*

---

```
001 function CasovaPrirazkaAkceleraci( $\downarrow \bar{v}_M(v_i)$ ,  $\downarrow a(v_i)$ ,  $\uparrow {}^{acc}T_M(v_i)$ )
002    ${}^{acc}T_M(v_i) \leftarrow 0$ 
003    ${}^{accel}T \leftarrow \bar{v}_M(v_i) / a(v_i)$  // doba potřebná pro akcelerační fázi jízdy
004    ${}^{accel}D \leftarrow \frac{1}{2} \times a(v_i) \times {}^{accel}T^2$  // dráha kterou ujede než dosáhne požadovanou rychlost
005    ${}^{full}T \leftarrow {}^{accel}D / \bar{v}_M(v_i)$  // doba jízdy při konstatní rychlosti
006    ${}^{acc}T_M(v_i) \leftarrow abs({}^{accel}T - {}^{full}T)$ 
007 end
```

---

Pro uvedené výpočty časových přírážek je uplatněn přístup založený na principu rovnoměrně zrychleného, respektive rovnoměrně zpomaleného pohybu s využitím parametru zrychlení  $a(v_i)$  (odvozeného z trakční charakteristiky dle průměrné rychlosti v submodelu) a parametru zpomalení vlaku  $b(v_i)$ . Tyto výpočty jsou dokumentovány pomocí formalizovaných postupů, které uvádí *Algoritmus 4* a *Algoritmus 5*.

## 9.5 Stanovení dalších parametrů vlaku pro jeho pohyb v následném submodelu

Z pohledu pohybu vlaku opouštějícího submodel provozu  $M$  v daném *makro-segmentu* a jeho konzistentního přechodu do následného submodelu  $M'$  (*mikroskopického* i *makroskopického*) je potřeba stanovit hodnoty další nezbytných parametrů v časovém okamžiku, kdy vlak do submodelu  $M$  vstupuje. Mezi tyto parametry je možné zahrnout:

- aktuální *výstupní rychlost* daného vlaku z *makro-segmentu*  $M$ ,
- vstupní element/bod do *makro-segmentu*  $M'$  (představuje výstupní element/bod z *makro-segmentu*  $M$ )

Aktuální výstupní rychlost daného  $i$ -tého vlaku představuje průměrnou rychlost ( $\bar{v}_M(v_i)$ ) na vlakových cestách, které jsou pro daný vlak v submodelu dostupné. Tato výsledná rychlost vychází z maximální povolené rychlosti na dané části příslušné infrastruktury pro daný typ vlaku, maximální konstrukční rychlosti vlakové soupravy a další proměnných, které se týkající například akcelerací/brzdění vlaku v submodelu vzhledem k jízdnímu řádu a podobně. V rámci provozu „nad“ *makro-hranou* je tato situace jednoznačná, protože submodel obsahuje jen jednu vlakovou cestu. Naopak v rámci provozu „nad“ *makro-vrcholem* záleží na množině specifikovaných cest (pro příslušný směr  $Od \rightarrow Do$ ).

Z pohledu *makro-segmentu*  $M$  a jeho odpovídající množiny specifikovaných (vlakových) cest, které jsou dostupné v příslušné zapouzdřené části *mikro-vrstvy*, lze každému vlaku přiřadit *vstupní* (počáteční) bod do submodelu  $M$ , respektive *výstupní* (koncový) bod ze submodelu  $M$ . Jelikož je každá cesta v rámci submodelu  $M$  určena příslušným směrem  $Od \rightarrow Do$ , který odpovídá krajním vrcholům (liniových souvislých podgrafů) zapouzdřených vlakových cest definovaných v příslušné části *mikro-vrstvy*, lze na základě směru pohybu vlaku na této části kolejiště přiřadit *vstupní* respektive *výstupní* bod (vrchol) v rámci submodelu  $M$  pro daný vlak. Například pokud se uvažuje hybridní model kolejiště zobrazen na obrázku (*Obrázek 20*), respektive specifikovaný *makro-vrchol* ( ${}^M v_1$ ), pak tento submodel obsahuje vstupní/výstupní body odpovídající vrcholům  $v_6$  a  $v_{11}$ . Pokud tedy do tohoto *makro-vrcholu* vstoupí vlak ze směru vrcholu  $v_6$ , tak po uplynutí doby jeho pobytu v submodelu, využije pro opuštění vždy výstupní bod odpovídající vrcholu  $v_{11}$ .

## 10 Návrh metodiky ScalRail

Tato kapitola shrnuje popsané postupy v předešlých částech práce a věnuje se obecnému návrhu metodiky *ScalRail* určené pro budování škálovatelných simulačních modelů železničního provozu, který aplikuje na odlišné části simulujícího systému různou míru abstrakce. Pro uplatnění metodiky *ScalRail* se předpokládá dostupnost příslušného softwarového nástroje, který podporuje budování unitárních hybridních simulátorů a následné provádění simulačních experimentů umožňujících vykonávání škálovatelných simulací.

Cílem metodiky je poskytnout jednak rámcový postup popisující vytvoření *unitárního hybridního simulačního modelu*, který umožňuje měnit *granularitu* pouze části simulátoru (implementovaného v rámci jedné softwarové aplikace) a jednak návod na vybudování a parametrizaci příslušného simulujícího systému (v rámci používaného softwarového nástroje) pro realizaci konkrétního scénáře simulačního experimentu.

Metodika je členěna do několika fází, kde každá fáze vyjadřuje samostatnou etapu zpracování. Základní struktura každé fáze je členěna do těchto samostatných bloků:

- **Cíl** určuje, čeho je třeba v rámci dané fáze dosáhnout.
- **Koncepce** stručně popisuje principy, které jsou v rámci fáze uplatňovány.
- **Vstupy** uvádějí soupis požadovaných vstupů.
- **Postup** vysvětluje konkrétní činnosti ke zpracování vstupů a dosažení výstupů.
- **Výstupy** slouží jako vstupy pro následující fázi.

Uvedený metodický postup má liniovou strukturu a je rozdělen do následujících fází:

- Fáze A – Konstrukce mikroskopického modelu infrastruktury
- Fáze B – Konstrukce hybridního modelu infrastruktury
- Fáze C – Parametrizace mikroskopického submodelu provozu
- Fáze D – Parametrizace makroskopického submodelu provozu
- Fáze E – Parametrizace řídicí vrstvy

Výsledkem uplatnění metodického postupu je vybudovaný simulující systém, který se zaměřuje na zkoumání železničního provozu nad příslušnou oblastí železniční sítě a to za použití dané konfigurace hybridního simulačního modelu. Při změně některých podmínek zkoumání je nutné celý postup opakovat, přičemž v některých fázích nemusí docházet ke změnám. Z pohledu série simulačních experimentů, ve kterých se zkoumání provádí nad stejnou oblastí železniční sítě a mění se pouze podmínky zkoumání, lze některé fáze metodického postupu uplatnit pouze jednou. Obecným předpokladem je především opakované uplatnění fáze B, ve které se konstruuje variabilní konfigurace hybridního modelu infrastruktury, a opakované uplatnění fáze D, ve které dochází k parametrizaci modelu provozu aplikovaného „nad“ specifikovanými *makro-segmenty*.

## 10.1 Fáze A - Konstrukce mikroskopického modelu infrastruktury

### Cíl

Cílem fáze A je konstrukce *mikroskopického modelu infrastruktury* s odpovídající úrovní rozlišení, přičemž vybraná úroveň rozlišení odpovídá nejvyšší míře podrobnosti, kterou chce *designér* dopravních simulací na danou železniční síť aplikovat.

### Koncepce

Obecně je mikroskopický model infrastruktury v rámci metodiky nazýván jako *mikro-vrstva agregovaného modelu infrastruktury*. Z pohledu *mikro-vrstvy* je rozlišováno mezi vizuální prezentací kolejové infrastruktury (specifikované ve *vizualizační vrstvě*) a definováním numerických údajů (specifikovaných v *datové vrstvě*) o metrických, topologických a sklonových poměrech. Pro potřeby vizualizace je uplatněn přístup využívající *schématické* zobrazení, které je vhodné nejen pro rychlé vybudování modelu kolejiště, ale zejména také pro provádění vizuálních deformací na rozhraní mikroskopických a makroskopických submodelů infrastruktury. Pro potřeby realistických výpočtů ohledně jízd vlaků je nutné, aby parametrizace objektů infrastruktury v rámci *datové* vrstvy věrně odražely příslušné realie.

### Vstupy

Vstupem pro tuto fázi je geografický plán reálného nebo projektovaného kolejiště, tabulky traťových poměrů, případně jiné dokumenty obsahující bližší popis zkoumané oblasti železniční sítě, s jejichž pomocí lze vybudovat odpovídající model kolejiště.

### Postup

K dosažení cíle této fáze je potřeba dodržet následující postup:

1. Primárně jsou do vytvářeného modelu kolejiště umístěny kolejové prototypy, jako jsou výhybky a kolejové křižovatky.
2. Dále jsou použity kolejové elementy, které propojují uvedené kolejové prototypy.
3. Následně jsou uvedené kolejové elementy a kolejové prototypy parametrizovány (tzn. je u nich specifikováno staničení, délka, rychlostní omezení, elektrifikace a podobně).
4. Poté jsou kolejové elementy vhodně dekomponovány pro potřeby dospecifikování změn sklonů, poloměrů oblouků, maximálních konstrukčních rychlostí a podobně.
5. Dále jsou zadány ostatní objekty železniční infrastruktury, jako jsou signalizační zařízení, nástupiště, námeznyky a podobně, a je provedena jejich parametrizace.
6. Následně je provedena vizuální a automatizovaná kontrola vytvořeného mikroskopického modelu infrastruktury.
7. Potom jsou poloautomaticky předpočítány množiny primárních a alternativních vlakových cest.
8. Posledním krokem je archivace (uložení) vybudovaného mikroskopického modelu infrastruktury do strukturované šablony v externí paměti.

## Výstupy

Výstupem je mikroskopický model infrastruktury, u kterého byla provedena vizuální a automatizovaná kontrola pro stanovení jeho validity, který dále obsahuje bázi primárních a alternativních vlakových cest, a který dle *designéra* dopravních simulací odpovídá reálné předloze dle aplikované úrovně podrobnosti.

## 10.2 Fáze B - Konstrukce hybridního modelu infrastruktury

### Cíl

Cílem fáze B je konstrukce *hybridního modelu infrastruktury*, který kombinuje oblasti uplatňující různou míru podrobnosti (mikroskopickou nebo makroskopickou).

### Koncepce

*Hybridní model infrastruktury* (nazývaný jako *hybridní vrstva agregovaného modelu infrastruktury*) zahrnuje submodely uplatňující odlišné úrovně podrobnosti (mikroskopickou a makroskopickou). Hybridní vrstva vzniká změnou, resp. snížením úrovně podrobnosti u specifikovaných submodelů *mikro-vrstvy*. Zmíněné submodely jsou v rámci metodiky nazývány jako *makro-segментy*. Dle uplatnění se *makro-segментy* rozlišují na *makro-vrcholy* a na *makro-hrany*. *Makro-vrchol* se typicky využívá pro zapouzdření železničních stanic a *makro-hrana* pro zapouzdření částí širých tratí (mezistaničních úseků). V rámci hybridního modelu infrastruktury je umožněno kombinovat *makro-vrcholy*, *makro-hrany* a mikroskopické elementy.

### Vstupy

Vstupem fáze B je mikroskopický model infrastruktury s odpovídající úrovní rozlišení, v rámci kterého dochází k výběru oblastí, které mají být zkoumány na hrubší (makroskopické) úrovni podrobnosti.

### Postup

K vybudování hybridního modelu infrastruktury je zapotřebí dodržet následující postup:

1. Primárně jsou vybrány železniční stanice, které mají být zkoumány na hrubší úrovni podrobnosti.
2. Následně je u uvedených železničních stanic vhodně stanovena jejich hranice (v rámci *mikro-vrstvy*) pro jejich zapouzdření s ohledem na kolejové uspořádání a dopravně významná místa, a jsou konstruovány *makro-vrcholy*.
3. Dále jsou vybrány části širých tratí, které mají být zkoumány na hrubší úrovni podrobnosti.
4. Následně je u uvedených částí širých tratí vhodně stanovena jejich hranice (v rámci *mikro-vrstvy*) pro jejich zapouzdření s ohledem na kolejové uspořádání a dopravně významná místa, a jsou vytvořeny odpovídající *makro-hrany*.



5. V hybridní vrstvě *agregovaného modelu infrastruktury* jsou propojeny mikroskopické elementy s *makro-segmenty*.
6. Posledním krokem je archivace (uložení) vybudované varianty hybridního modelu infrastruktury do strukturované šablony v externí paměti.

## Výstupy

Výstupem je aktuální konfigurace hybridního modelu infrastruktury, který kombinuje oblasti mikroskopické, které jsou z pohledu daného zkoumání nosné, a oblasti makroskopické, které nemusí být detailně posuzovány a může se v jejich rámci uplatnit pouze hrubší úroveň zkoumání.

## 10.3 Fáze C - Parametrizace mikroskopického submodelu provozu

### Cíl

Cílem této fáze je parametrizace mikroskopického submodelu provozu zejména z pohledu prověřovaného jízdního řádu. Fáze v sobě zahrnuje především detailní informace z mikroskopického submodelu infrastruktury a vytvoření potřebných mobilních entit (vlaků) s jejich základními charakteristikami.

### Koncepce

Pro mikroskopické části hybridní vrstvy je využit *mikroskopický submodel provozu* uplatňující výpočty dynamiky jízd jednotlivých vlaků a jejich vzájemných interakcí. Tedy dochází k individuálnímu sledování každé vlakové soupravy. Pro tyto výpočty se využívají detailní informace o infrastruktuře (*metrické/topologické* a *sklonové poměry*) dostupné v *datové* vrstvě a samozřejmě i technické údaje zadané pro jednotlivé vlaky.

### Vstupy

Vstupem je aktuální konfigurace hybridního modelu infrastruktury, a to převážně ta část obsahující detailní informace o kolejišti v mikroskopických oblastech, dokumenty obsahující detailní popis charakteristik jednotlivých vlaků a prověřovaný jízdní řád.

### Postup

Pro mikroskopický submodel provozu je v této fázi potřeba vytvořit sadu potřebných mobilních entit (vlaků) s odpovídajícími charakteristikami dle prověřovaného jízdního řádu, přičemž postup je následující:

1. Primárně jsou specifikována příslušná hnací vozidla s odpovídajícími charakteristikami, mezi které patří například: hmotnosti, délky, maximální konstrukční rychlosti, trakční charakteristiky, odpory hnacích vozidel, koeficienty zpomalení, výkony hnacích vozidel a podobně.

2. Následně jsou definovány příslušné typy železničních (tažených) vozů s odpovídajícími charakteristikami, mezi které patří například: hmotnosti, délky, maximální konstrukční rychlosti, vozidlové odpory a podobně).
3. Dále jsou vytvořeny vlaky, které v sobě zahrnují vybraná hnací vozidla, tažené vozy a jejich vzájemné řazení.
4. Potom je přiřazena každému vlaku sada vlakových cest, která zahrnuje primární a alternativní vlakové cesty (tzn. jsou přiřazeny například prioritní seznamy vlakových cest).
5. Následně je každému vlaku přiřazen čas příjezdu do zkoumané oblasti dle jízdního řádu.

### Výstupy

Výstupem jsou provedená nastavení (parametrizace) mikroskopického submodelu provozu dle prověřovaného jízdního řádu.

## 10.4 Fáze D - Parametrizace makroskopického submodelu provozu

### Cíl

Cílem této fáze je parametrizace statických atributů *makro-segmentů*, které upřesňují charakter provozu v makroskopických submodelech provozu.

### Koncepce

Pro *makro-segmenty* v rámci hybridního modelu infrastruktury je využit *makroskopický submodel provozu* založený na analogii se soupeřením o sdílené zdroje. Základním předpokladem je uplatnění vyšší míry abstrakce, kde nejsou vlakové soupravy individuálně sledovány po celou dobu jejich pobytu v rámci *makro-segmentu*. Vše potřebné je předpočítáno při vstupu vlaku do makroskopického submodelu, v průběhu jeho „pobytu“ může docházet jen k přepočtu některých *dynamických atributů*, které mohou být ovlivněny aktuální dopravní situací v navazujícím submodelu (mikroskopickém nebo makroskopickém).

V rámci každého vytvořeného *makro-segmentu* se evidují agregované informace odrážející příslušnou oblast *mikro-vrstvy* (nazývané jako *statické atributy*), které ovlivňují charakter provozu „nad“ těmito oblastmi. Mezi tyto informace patří například množina všech přípustných *sdílených zdrojů*, *maximální povolené rychlosti na infrastruktuře* a podobně. Tyto statické atributy mohou být automaticky stanoveny z atributů definovaných v příslušné oblasti mikroskopického modelu kolejistě nebo mohou být stanoveny explicitně.

### Vstupy

Vstupem je aktuální konfigurace hybridního modelu infrastruktury se specifikovanými oblastmi, v rámci kterých je aplikována makroskopická úroveň podrobnosti, a prověřovaný jízdní řád.

## Postup

U každého *makro-segmentu* lze specifikovat jednotlivé statické atributy, přičemž je zapotřebí dodržet následující postup:

1. Primárně je pro každý *makro-segment* nutné stanovit vstupní respektive výstupní body submodelu.
2. Následně je pro každý *makro-vrchol* stanovena množina všech sdílených zdrojů (například staničních kolejí).
3. Následně je pro každou *makro-hranu* stanoveno následné mezidobí.
4. Posledním krokem je stanovení průměrných délek vlakových cest pro každý *makro-segment*.

## Výstupy

Výstupem jsou provedená nastavení (parametrizace) makroskopického submodelu provozu dle prověřovaného jízdního řádu.

## 10.5 Fáze E - Parametrizace řídicí vrstvy

### Cíl

Cílem fáze E je parametrizace řídicí vrstvy, která slouží především jako podpora rozhodování při konfliktních situacích v rámci prováděných škálovatelných simulací.

### Koncepce

Hlavním úkolem řídicí vrstvy je řízení simulace, ve které dochází například k aktualizaci simulačního času, aktualizaci atributů jednotlivých vlaků, generování náhodné hodnoty vstupního zpoždění vlaků, stavění vlakových cest, řešení konfliktních situací během pohybu vlaku po infrastruktuře, sběr dat o prováděné simulaci, spouštění následující replikace a podobně.

V rámci submodelu provozu (mikroskopického i makroskopického) mohou během pohybu vlaku po infrastruktuře nastat i některé konfliktní situace, kdy například více vlaků požaduje stejný obslužný zdroj. Hlavním úkolem řídicí vrstvy je tyto konfliktní situace řešit a to dle zvolené strategie, která může být založena například na prioritních seznamech alternativních vlakových cest a podobně.

### Vstupy

Vstupem je aktuální konfigurace hybridního modelu infrastruktury, parametrizace mikroskopického i makroskopického submodelu provozu a informace o prováděném simulačním scénáři.

## Postup

Pro parametrizaci řídicí vrstvy je potřeba dodržet následující postup:

1. Primárně je stanovena strategie přidělování alternativních vlakových cest v rámci mikroskopických submodelů při aktuálním obsazení kolejiště (například dle priority vlakové cesty a podobně).
2. Dále jsou sdílené zdroje dostupné v rámci každého *makro-segmentu* rozřazeny dle směrů (tzn. je specifikována strategie přidělování sdílených zdrojů v rámci jednotlivých makroskopických submodelů provozu).
3. Potom je každému vlaku přiřazeno místo na infrastruktuře, prostřednictvím kterého vstupuje do simulujícího systému, a doby pobytu (například u staniční koleje a podobně) odpovídající jízdnímu řádu.
4. Dále je stanoven počet replikací pro daný simulační scénář.
5. Posledním krokem je stanovení, zda bude vlak na vstupu do systému zpožděn (například s využitím generátoru pseudonáhodných čísel řídicí se Bernoulliho rozdělením pravděpodobnosti) a přiřazení konkrétní hodnoty zpoždění (například dle exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti s hodnotami parametrů, které jsou specifikovány pro odlišné kategorie vlaků).

## Výstupy

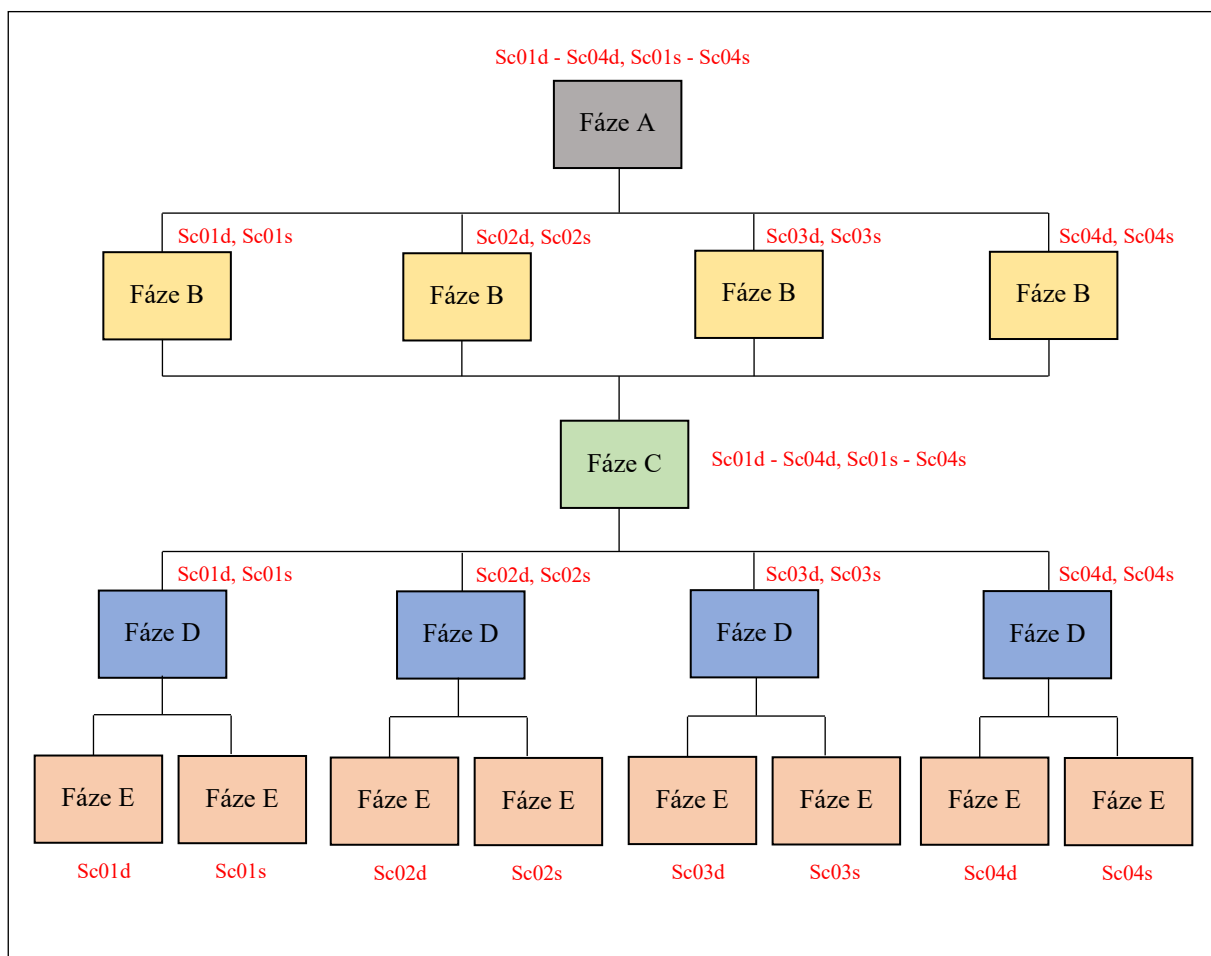
Výstupem je provedená parametrizace řídicí vrstvy pro potřeby daného simulačního scénáře, který definuje prověřovanou konfiguraci hybridního modelu železničního provozu.

### 10.6 Použití metodiky v simulační studii

Představená metodika *ScalRail* umožňuje vytvářet variantní konfigurace hybridního simulačního modelu před zahájením simulačních experimentů zaměřených na železniční provoz. V rámci simulačních experimentů je pak například možné se zaměřit na detailní zkoumání pouze úzkých provozních míst a pro ostatní oblasti aplikovat pouze hrubší úroveň zkoumání. Následující obrázek (*Obrázek 35*) znázorňuje metodický postup uplatněný v rámci případové studie (blíže popsané v následující kapitole), ve které byly vytvořeny odlišné konfigurace hybridního simulačního modelu.

V rámci případové studie byla nejdříve uplatněna fáze A (pro zkonstruování mikroskopického modelu infrastruktury zkoumané oblasti). Jelikož mikroskopický model kolejiště byl pro všechny simulační scénáře shodný, byla fáze A provedena pouze jednou. Dále byly násobně provedeny fáze B, jejich počet odpovídal počtu potřebných konfigurací hybridního modelu infrastruktury. Následně byla uplatněna fáze C, v rámci které byly specifikovány příslušné vlaky (a jejich základní charakteristiky) s parametrizací mikroskopického submodelu provozu dle prověřovaného jízdního řádu. Pro potřeby případové studie byla parametrizace v rámci této fáze pro všechny vybrané scénáře provedena pouze jednou. Potom byla pro každou konfiguraci hybridního modelu infrastruktury opakovaně provedena fáze D, v rámci které došlo k parametrizaci makroskopických submodelů provozu pracujících „nad“ makroskopickými oblastmi hybridního modelu infrastruktury. V posledním kroku byla v

rámci případové studie dvakrát uplatněna fáze E, ve které byla specifikována řídicí vrstva uplatňující deterministické respektive stochastické simulace.



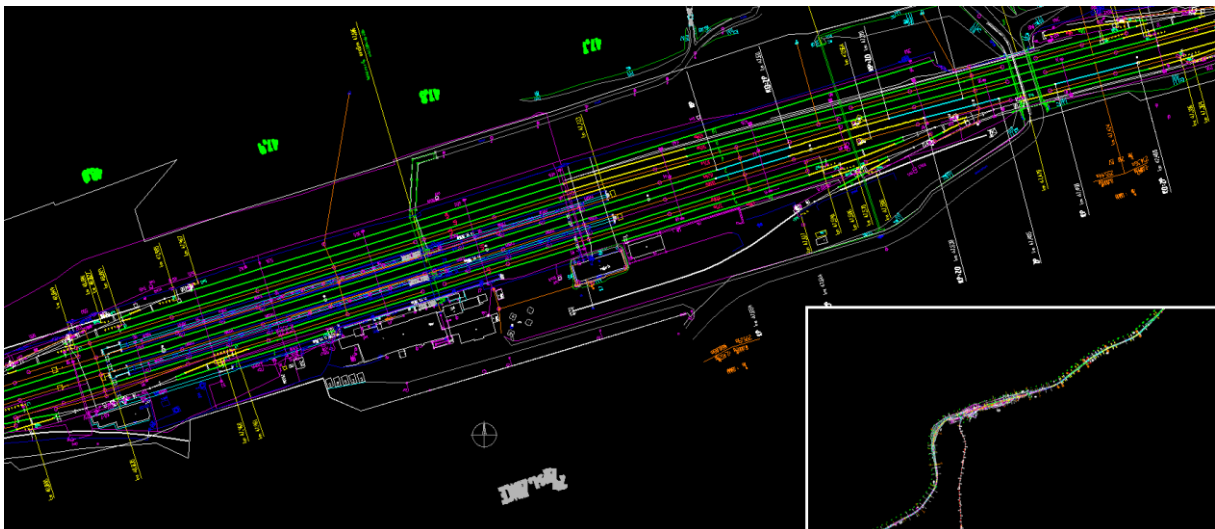
Obrázek 35 - Metodický postup uplatněný v rámci případové studie. Zdroj: vlastní

## 11 Případová studie

Z pohledu využití unitárního hybridního modelu v praxi je nutné, aby výsledky deterministických a zejména stochastických simulačních experimentů byly správné a odpovídaly provozu, tak jak by probíhal v realitě. Pro budování škálovatelného simulačního modelu bylo klíčové provedení porovnání výsledků simulačních experimentů při různých konfiguracích hybridního simulačního modelu s výsledky simulačních experimentů dosažených jednak s použitím příslušného mikroskopického simulačního modelu a jednak s výsledky z jiných simulačních nástrojů. Porovnání probíhalo vzhledem k jízdním dobám vlaků a dále k úhrnným hodnotám přírůstků zpoždění všech vlaků. Uvedené simulační experimenty jsou demonstrovány v simulačním nástroji *SimTrackEd* na případové studii železničního provozu.

### 11.1 Základní charakteristiky vybrané oblasti reálné železniční sítě

Pro potřeby simulačních experimentů bylo zapotřebí mít k dispozici nejen reálný model vybrané oblasti železniční sítě, ale samozřejmě i grafikon realistické vlakové dopravy pro tuto oblast. S ohledem na existenci modelu infrastruktury (získaný od SŽ, s.o.) a zejména výsledků nedávno provedených simulačních experimentů železničního provozu v simulátoru *Villon*, byla pro případovou studii vybrána oblast železniční stanice (Zdice) a přilehlého okolí (*Obrázek 36*). Geografický plán kolejiště v reálném měřítku (ve formátu dgn) zahrnoval nejen prototypovou stanici Zdice, ale i tratě vedoucí do okolních železničních stanic (Hořovice, Beroun a Lochovice). V rámci dat získaných od společnosti SŽ, s.o. byl k dispozici i dokument obsahující tabulky traťových poměrů (*TTP*), který obsahuje informace o traťových rychlostech v daných úsecích tratí.



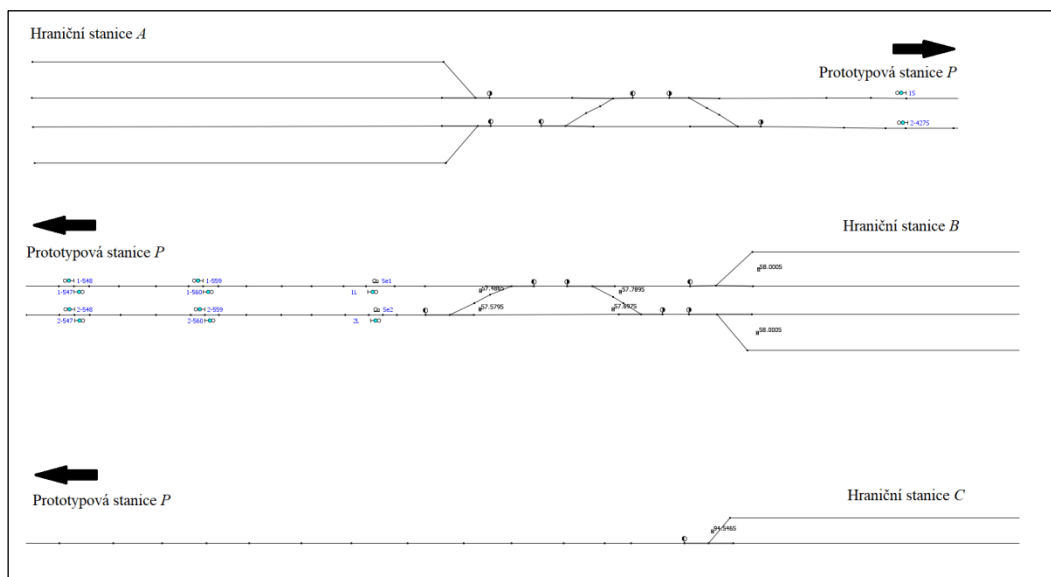
Obrázek 36 - Geografický model infrastruktury v měřítku. Zdroj: SŽ, s.o.

## Model infrastruktury

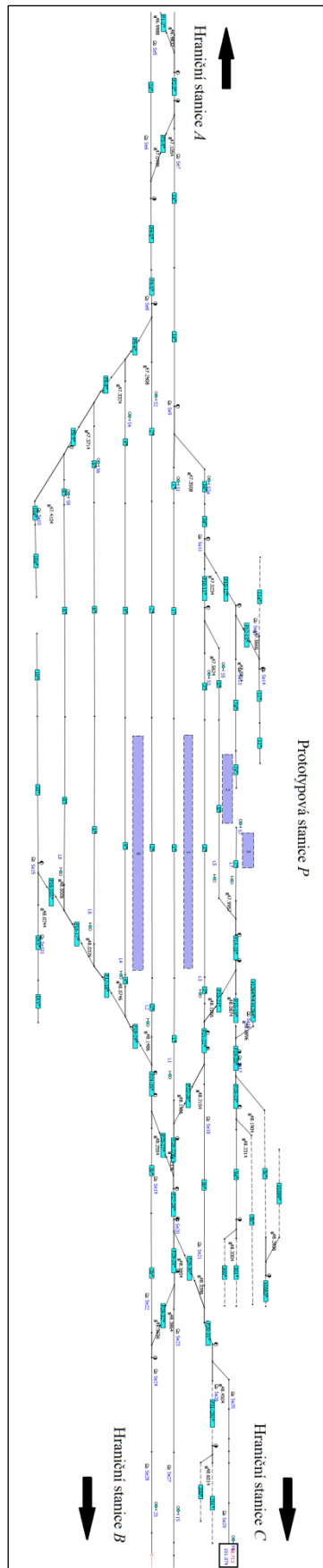
Pro potřeby této studie byly v rámci modelu infrastruktury zkoumaného systému, který vychází z reálného geografického plánu kolejí, zahrnuty:

- Prototypová železniční stanice osobní dopavy (označovaná jako *P*).
- Hraniční stanice, které byly modelovány s menší přesností (sledována byla pouze zjednodušená infrastruktura). Pro potřeby této studie byla stanice Beroun označována jako *A*, stanice Hořovice jako *B* a nakonec stanice Lochovice jako *C*.
- Trati vedoucí z prototypové stanice do sousedních hraničních stanic. Do stanice *A* a *B* vedou dvoukolejné trati, přičemž do stanice *C* vede trať jednokolejná. Celková délka kolejí v rámci celého modelu kolejí činila kolem 20 km.
- Reálné sklonové a obloukové poloměry jednotlivých kolejí.
- Izolované obvody, rozmístění návěstidel a námezníků, elektrifikace, rychlostní omezení a podobně.
- Primární a alternativní vlakové cesty vedoucí přes odlišné staniční koleje prototypové stanice *P* (parametrizace a výběry vlakových cest byly prováděny na základě konzultace s technologem).

Pro účely simulačních experimentů bylo zapotřebí výše uvedený plán kolejí v měřítku věrně převést do editačního nástroje *TrackEd* v podobě schématického plánu s odpovídajícími reálnými topologickými/metrickými a sklonovými poměry (Obrázek 37, Obrázek 38). Pro tyto účely byl model železniční infrastruktury v editoru vhodně dekomponován na atomické úseky tak, aby bylo možné věrně zaznamenat ty části kolejí, kde se mění jeho vlastnosti (sklony, poloměry oblouků, rychlostní omezení a podobně). V této souvislosti byl uplatněn postup konstrukce mikroskopického modelu infrastruktury uvedený v rámci návrhu metodiky *ScalRail*.



Obrázek 37 - Mikroskopický model infrastruktury hraničních stanic v editoru *TrackEd*. Zdroj: vlastní

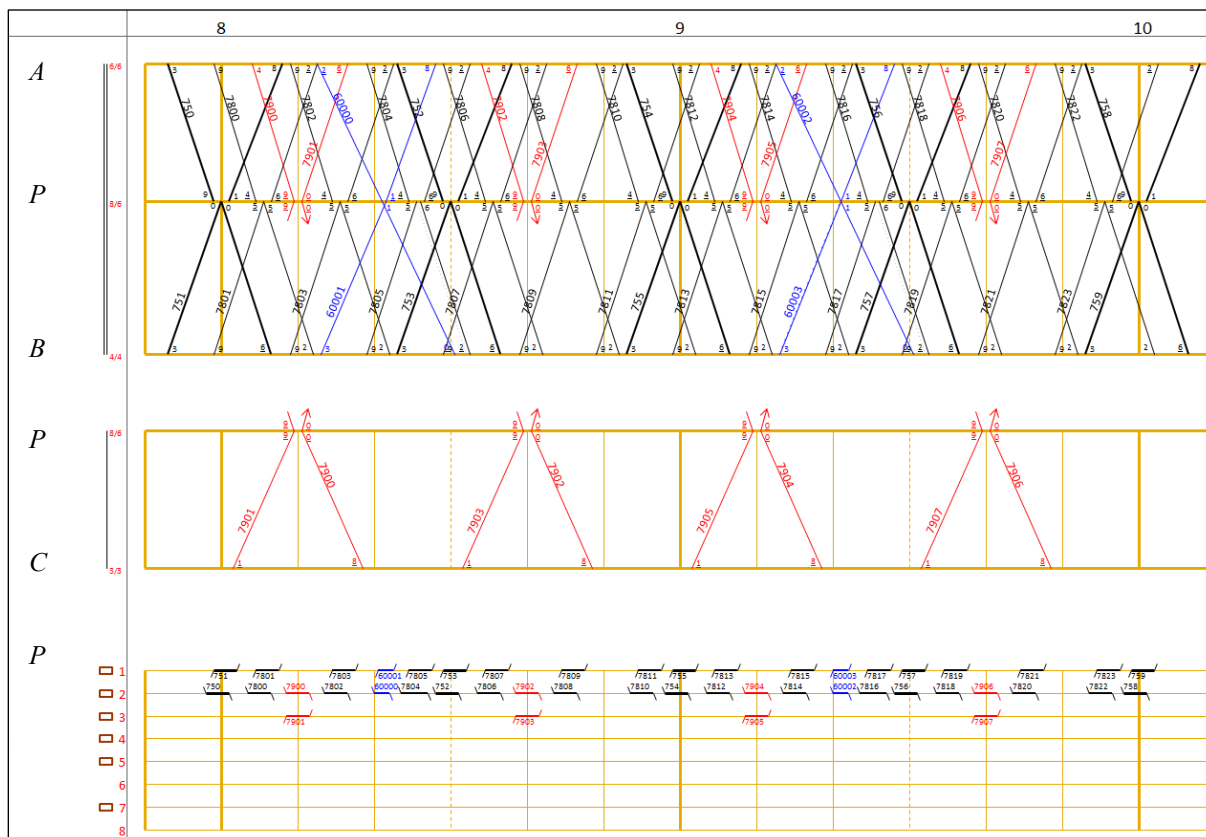


Obrázek 38 - Mikroskopický model infrastruktury prototypové stanice v editoru TrackEd.  
Zdroj: vlastní



## Model provozu

Z pohledu modelu provozu byl definován grafikon vlakové dopravy (Obrázek 39) sestavený železničním expertem pro uvedenou oblast železniční sítě ČR. Příslušný jízdní řád zahrnoval celkem 46 vlaků ve všech směrech rozložených v rámci dvouhodinové špičky dopravního provozu (8:00-10:00 hod.). Grafikon obsahoval dálkovou, regionální i nákladní dopravu. V rámci jízdního řádu vstupovaly první vlaky do zkoumané oblasti infrastruktury v hraničních stanicích *A* a *B* (v čase 7:53 hod.) a poslední vlak opouštěl zkoumanou oblast v hraniční stanici *A* (v čase 10:08 hod.).



Obrázek 39 - Prověřovaný grafikon vlakové dopravy. Zdroj: SŽ, s.o.

Vlaky v rámci jízdního řádu se lišily nejen svou skladbou, ale zejména dalšími parametry jako jsou: celková hmotnost, délka a maximální povolená rychlost soupravy, vozidlové odpory, trakční charakteristiky a podobně. Následující tabulka zobrazuje vybrané charakteristiky jednotlivých vlakových souprav (Tabulka 5).

Kategorie dopravy	Takt [min]	Trasa	Počty hnacích vozidel / tažených vozů	Celková hmotnost [t]	Celková délka [m]
Dálková	30	$A \rightarrow P \rightarrow B$	1 / 7	429,0	201,6
Dálková	30	$B \rightarrow P \rightarrow A$	1 / 7	429,0	201,6
Regionální	10	$A \rightarrow P \rightarrow B$	2 / 4	310,8	158,4
Regionální	10	$B \rightarrow P \rightarrow A$	2 / 4	310,8	158,4
Regionální	30	$A \rightarrow P \rightarrow C$	1 / 2	155,4	79,2

Kategorie dopravy	Takt [min]	Trasa	Počty hnacích vozidel / tažených vozů	Celková hmotnost [t]	Celková délka [m]
Regionální	30	$C \rightarrow P \rightarrow A$	1 / 2	155,4	79,2
Nákladní	60	$A \rightarrow B$	1 / 22	1099,0	335,8
Nákladní	60	$B \rightarrow A$	1 / 22	1099,0	335,8

Tabulka 5 - Vybrané charakteristiky vlaků. Zdroj: SŽ, s.o.

Z pohledu jízdního řádu byl pro prototypovou stanicí  $P$  k dispozici i statický plán (prioritní seznam) přidělování staničních (nástupištních) kolejí, který stanovuje přidělení staniční koleje pro konkrétní vlak (Tabulka 6). Při ideálním železničním provozu se v rámci plánu počítalo s přidělením staničních kolejí #1, #2 a #3. Naopak, pokud přidělení těchto staničních kolejí aktuální dopravní situace neumožňovala, bylo pro alternativní možnost přidělování určeno celkem 6 staničních kolejí (#1, #2, #3, #4, #6 a #8), přičemž koleje #6 a #8 sloužily výhradně pro nákladní dopravu.

Kategorie dopravy	Směr Od	Směr Do	Vlaky	Prioritní seznam přidělování staničních kolejí			
				1.	2.	3.	4.
Dálková	$A$	$B$	750, 752, ..., 758	#2	#4	#1	#3
Dálková	$B$	$A$	751, 753, ..., 759	#1	#3	#2	#4
Regionální	$A$	$B$	7800, 7802, ..., 7822	#2	#4	#1	#3
Regionální	$B$	$A$	7801, 7803, ..., 7821	#1	#3	#2	#4
Regionální	$A$	$C$	7900, 7902, ..., 7906	#2	#4	#1	#3
Regionální	$C$	$A$	7901, 7903, ..., 7907	#3	#1	#2	#4
Nákladní	$A$	$B$	60000, 60002	#2	#4	#6	#8
Nákladní	$B$	$A$	60001, 60003	#1	#2	#6	#8

Tabulka 6 – Statický plán přidělování staničních kolejí v prototypové stanici  $P$ . Zdroj: SŽ, s.o.

V rámci stochastických simulačních experimentů byly vlaky na vstupu do systému zatíženy náhodnými zpožděními. K určení, zda bude konkrétní vlak na vstupu do systému zpožděn, se využíval generátor pseudonáhodných čísel řídicí se Bernoulliho rozdělením pravděpodobnosti. Dále bylo v souladu s metodikou *SM124 - Zjišťování kapacity dráhy* (od společnosti SŽ, s.o.) zpožděnému vlaku přiřazena konkrétní hodnota zpoždění, která byla generována dle exponenciálního rozdělení pravděpodobnosti s hodnotami parametrů specifikovanými pro odlišné kategorie vlaků v tabulce níže (Tabulka 7) [66].

Kategorie dopravy	Podíl zpožděných vlaků [-]	Střední hodnota zpoždění [s]	Maximální hodnota zpoždění [s]
Dálková	0,50	420	7200
Regionální	0,33	270	7200
Nákladní	0,50	1800	7200

Tabulka 7 - Parametry zpoždění vlaků. Zdroj: SŽ, s.o.

## 11.2 Základní informace o prováděných simulačních experimentech

Aby byl unitární hybridní model železniční dopravy, který aplikuje na odlišné části simulujícího systému různou míru abstrakce, použitelný pro praxi, je nutné, aby výsledky simulace v dostatečné míře odpovídaly realitě. Požadované chování hybridních modelů je takové, že prováděné transformace dopravních toků na rozhraních mikroskopických a makroskopických oblastí musí mít minimální vliv na konečné hodnoty zpoždění vlaků (v porovnání s hodnotami získanými z mikroskopických modelů). Z pohledu hybridního modelu provozu (v nástroji *SimTrackEd*) respektive ověření jeho správnosti byly prováděny následující simulační experimenty:

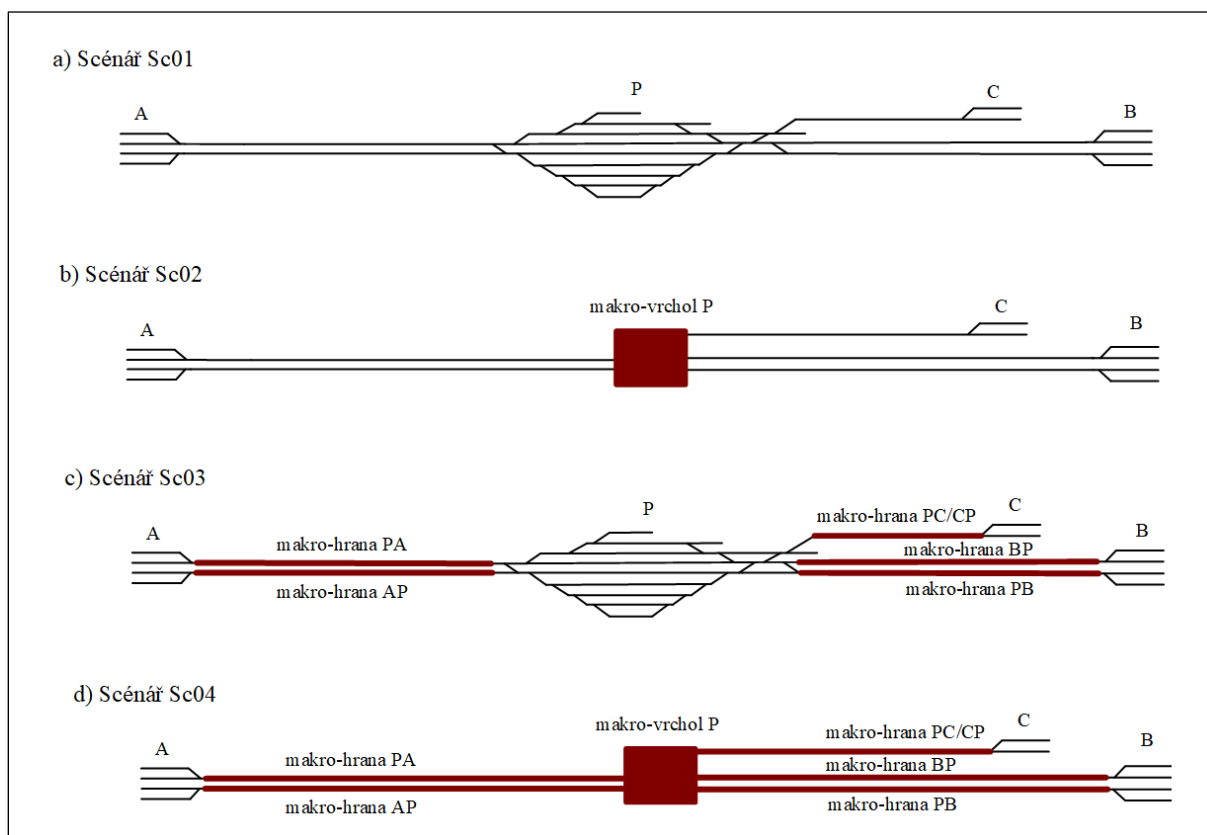
- deterministické simulace s využitím mikroskopického modelu provozu,
- deterministické simulace s využitím hybridního modelu provozu,
- stochastické simulace (s náhodnými zpožděními vlaků) s využitím mikroskopického modelu provozu,
- stochastické simulace (s náhodnými zpožděními vlaků) s využitím hybridního modelu provozu.

Simulační experimenty zkoumaly železniční provoz řídicí se uvedeným jízdním řádem. Provoz se uskutečňoval na infrastruktuře složené z jedné centrální prototypové stanice *P*, částí přilehlých železničních tratí a hraničních stanic (*A*, *B* a *C*), v jejichž rámci vlaky vstupovaly do a vystupovaly ze zkoumaného simulujícího systému. V rámci validace hybridního simulačního modelu provozu byly postupně prováděny jak deterministické, tak stochastické simulační experimenty pro vybrané odlišné scénáře (*Obrázek 40*). Každý ze scénářů je odlišen unikátním identifikátorem, který je doplněn o příponu vyjadřující, zda se v rámci daného scénáře prováděly deterministické (přípona *d*) nebo stochastické (přípona *s*) simulace. V rámci níže uvedených scénářů se využívaly simulační modely s následujícími charakteristikami:

- simulační model pracující výhradně na mikroskopické úrovni podrobnosti (scénáře: *Sc01d* a *Sc01s*),
- hybridní simulační model se zapouzdřenou prototypovou stanicí do *makro-vrcholu* (scénáře: *Sc02d* a *Sc02s*),
- hybridní simulační model se zapouzdřenými částmi širých tratí (spojujícími prototypovou stanicí a hraniční stanice) do *makro-hran* (scénáře: *Sc03d* a *Sc03s*),
- hybridní simulační model, který zahrnuje oba typy *makro-segmentů* (scénáře: *Sc04d* a *Sc04s*).

Pro účely hodnocení některých výpočtů prováděných s využitím hybridního modelu provozu v nástroji *SimTrackEd*, byl odpovídající simulující systém vybudován i v rámci simulátoru *Villon*, který simuloval provoz ve stejné oblasti železniční sítě. Tento simulační nástroj představuje software expertně validovaný a akceptovaný odborníky z železniční praxe (ze společnosti SŽ, s.o.). I když simulátor *SimTrackEd* není primárně zaměřen na simulace železničního provozu na mikroskopické úrovni podrobnosti (jako je tomu u simulátoru

Villon), porovnání hodnot vybraných provozních indikátorů bylo nutné pro ověření míry přesnosti mikroskopického modelu provozu v simulátoru *SimTrackEd*.



Obrázek 40 - Variantní konfigurace modelu infrastruktury pro odlišné scénáře. Zdroj: vlastní

### Indikátor jízdních dob

V rámci deterministických simulačních experimentů (odpovídajících scénářům *Sc01d*, *Sc02d*, *Sc03d* a *Sc04d*) byla sledována hodnota indikátoru odpovídající dosaženým jízdním dobám vlaků (určující míru přesnosti simulace aktuální konfigurace hybridního modelu železničního provozu). Jízdní doba vlaku odpovídala časovému úseku, který vlak potřeboval pro překonání vzdálenosti mezi hraničními stanicemi, ve kterých vlak vstupoval do a vystupoval ze zkoumané oblasti infrastruktury.

### Indikátor úhrnných vážených přírůstků zpoždění

V rámci stochastických simulací (*Sc01s*, *Sc02s*, *Sc03s* a *Sc04s*), kdy byla pro některé vstupující vlaky potenciálně vygenerována náhodná zpoždění, byl hlavní indikátor spjat se sumou dosažených vážených přírůstků zpoždění všech vlaků (označován jako *SWDI - Sum of Weighted Delay Increments*). Přírůstek zpoždění každého vlaku odpovídal rozdílu příslušného zpoždění na vstupu do a na výstupu ze zkoumaného systému. Hodnota přírůstku zpoždění každého sledovaného vlaku byla následně vynásobena příslušnou vahou, která odpovídá důležitosti vlaku v dopravním provozu. Hodnoty jednotlivých vah dle kategorie dopravy, které vychází ze směrnice *SM124* (od společnosti SŽ, s.o.) [66], jsou uvedeny v následující tabulce (*Tabulka 8*).

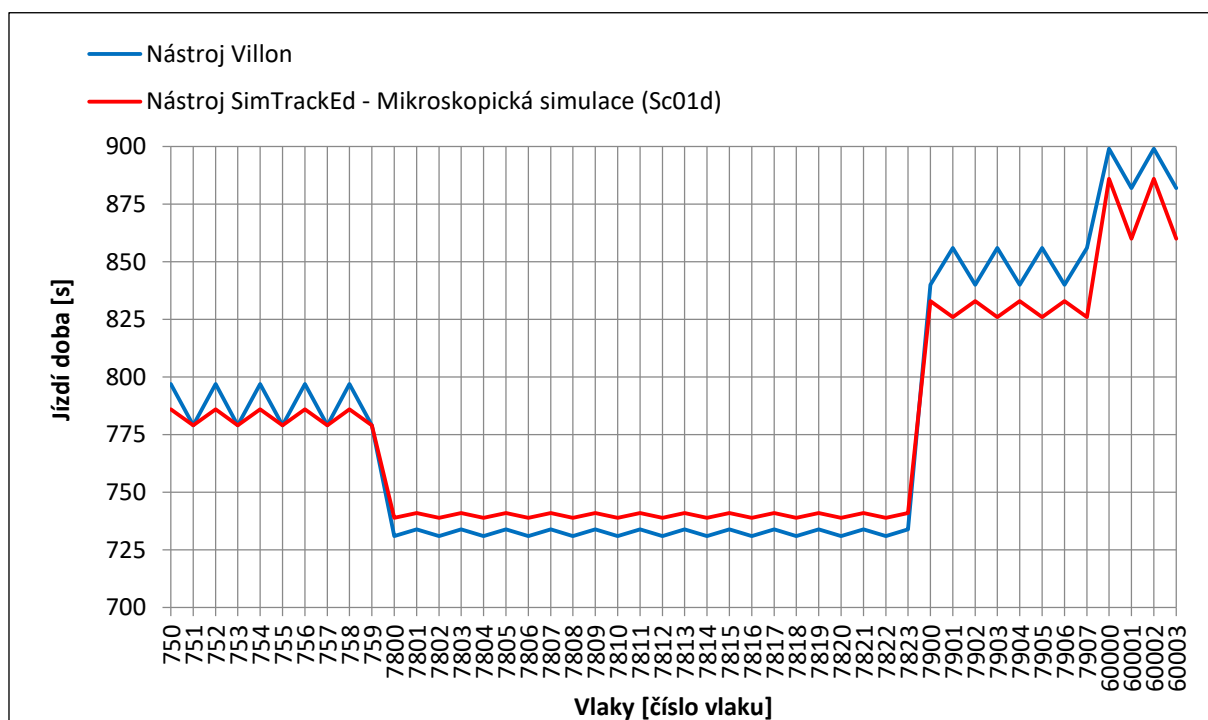
Kategorie dopravy	Váha
Dálková	1,8
Regionální	1,0
Nákladní	0,2

Tabulka 8 - Váhy jednotlivých sledovaných typů dopravy. Zdroj: SŽ, s.o.

Za účelem získání dostatečného rozsahu výstupních dat ze stochastických simulací pro jejich následné statistické zpracování, bylo pro příslušné scénáře prováděno 100 replikací. Pro potřeby statistického vyjádření charakteru provozu bylo využito aritmetického průměru z *SWDI* hodnot všech replikací příslušejících k danému scénáři (označován jako indikátor *meanSWDI*). Pro uvedený indikátor *meanSWDI* se určoval i 95% interval spolehlivosti, přičemž pološířka tohoto intervalu se vyjadřovala absolutní hodnotou označovanou jako *halfWidth*.

### 11.3 Deterministické simulační experimenty

Dle grafikonu (Obrázek 39), který obsahoval desítky vlaků jedoucích v různých směrech, byla prvotně provedena série deterministických simulačních experimentů zaměřených na verifikaci a validaci implementovaného mikroskopického modelu provozu (scénář *Sc01d*).



Obrázek 41 - Porovnání jízdních dob v rámci deterministické mikroskopické simulace. Zdroj: vlastní

Po provedení experimentů byly statisticky vyhodnoceny výsledky a porovnány rozdíly v jízdních dobách, zejména odchylky ve splněných grafikonech. V zásadě se jednalo o rozdíly v jednotkách procent, kde rozdíly v jízdních dobách jednotlivých vlaků (vůči stejným výsledkům ze simulátoru *Villon*) byly v rozmezí od  $-3,5\%$  do  $+1,1\%$ . Průměrný rozdíl pro

všechny vlaky dosahoval hodnoty  $-0,26\%$ . Z důvodu, že uvedené hodnoty nepřekročily expertně stanovenou hraniční hodnotu  $\pm 5\%$ , byly tyto rozdíly z pohledu uplatnění vyšší míry abstrakce v nástroji *SimTrackEd* zanedbatelné (Obrázek 41). Výše zmíněný implementovaný mikroskopický model provozu byl z pohledu deterministické simulace na mikroskopické úrovni vyhodnocen jako vyhovující [35, 36].

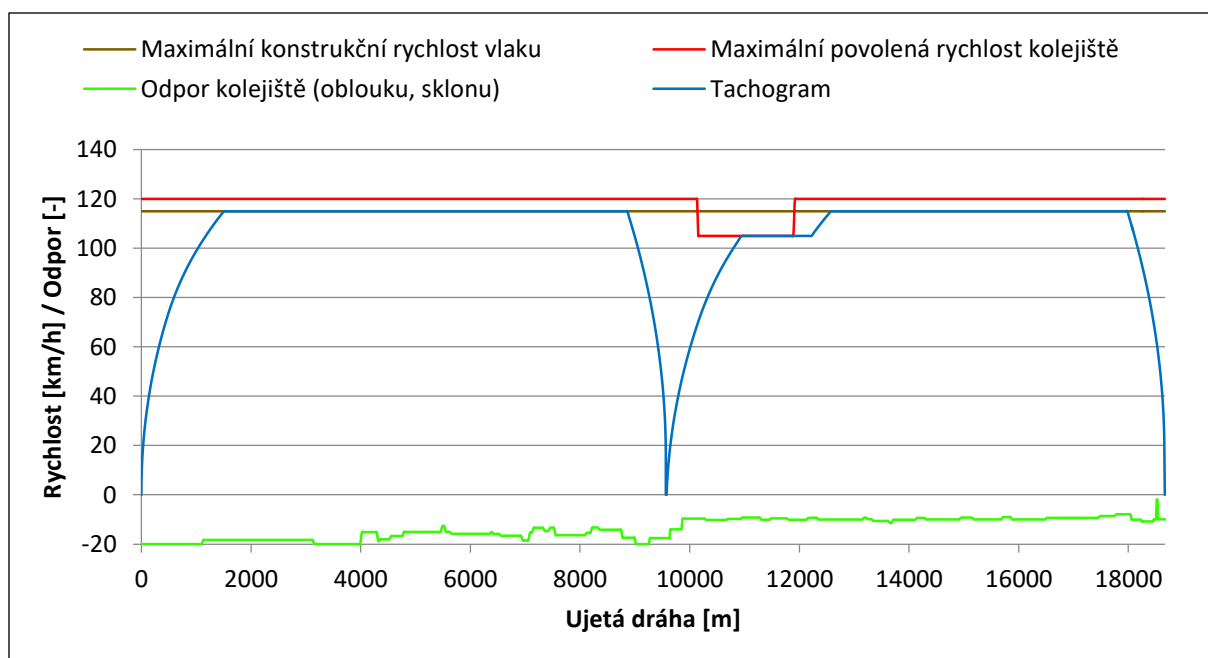
Doplňkově bylo provedeno, pro určení míry přesnosti simulátoru *SimTrackEd*, vizuální porovnání vybraných tachogramů v rámci výše uvedeného deterministického scénáře *Sc01d*. Avšak porovnání tachogramů získaných z nástrojů *Villon* a z nástroje *SimTrackEd* bylo v rámci posuzování přesnosti implementovaného mikroskopického modelu provozu pouze okrajové, protože:

- nástroj *Villon* uplatňuje vyšší míru podrobnosti v rámci mikroskopického modelu infrastruktury a jeho datová vrstva tedy obsahuje vyšší úroveň detailů, než je tomu u nástroje *SimTrackEd*,
- výpočet dynamiky jízdy jednotlivých vlaků v rámci mikroskopickém modelu provozu v simulátoru *SimTrackEd* se může od simulátoru *Villon* lišit.

Pro ilustraci jsou uvedeny tachogramy z nástroje *Villon* a *SimTrackEd* (Obrázek 42, Obrázek 43) znázorňující závislost rychlosti vybraného vlaku na jeho ujeté dráze. Tachogramy vykreslují průběh jízdy vlaku (konkrétně osobního vlaku 7800), ve kterém je znázorněno zastavení vlaku v prototypové stanici *P* a v hraniční stanici *B*, kde tento vlak zkoumaný systém opouští. Oba tachogramy se nepatrně liší zejména v celkové ujeté dráze vlaku, ve stanoveném místě pro zastavení vlaku na staniční koleji a v místech na infrastruktuře, kde se mění její vlastnosti, jako jsou například sklony, poloměry oblouků, maximální povolené rychlosti a podobně.



Obrázek 42 - Tachogram vybraného vlaku 7800 z nástroje *Villon*. Zdroj: vlastní



Obrázek 43 - Tachogram vybraného vlaku 7800 z nástroje SimTrackEd. Zdroj: vlastní

### Modely provozu nad makro-vrcholem

Z pohledu validace makroskopického submodelu provozu byla prototypová stanice  $P$  zapouzdřena do *makro-vrcholu* (scénář *Sc02d*). Vznikla tak varianta hybridního modelu provozu, která aplikovala různou míru *granularity* v rámci simulátoru. Výsledky deterministických simulačních pokusů takto konstruovaného hybridního modelu provozu byly porovnány s výsledky, kdy byl na celou železniční infrastrukturu použit mikroskopický model provozu. Při ověřování správnosti hybridního modelu provozu byla věnována pozornost především odchylkám v *sumárních jízdních dobách* všech sledovaných vlaků, které během pohybu po infrastruktuře projížděly přes *makro-vrchol*. Obecně se pro uspokojivé vyhodnocení výsledků hybridního modelu provozu předpokládá, že transformace dopravních proudů (na rozhraní mikroskopických a makroskopických součástí hybridního modelu) ovlivňují hodnoty jízdních dob vlaků na výstupu ze sledovaného systému pouze minimálně (v porovnání s výsledky simulací pracujících výhradně na mikroskopické úrovni podrobnosti).

V případě *makro-vrcholu* byl nejprve testován makroskopický model provozu založený na modelu proudění kapaliny [7], kde je hustota dopravního proudu ovlivněna počtem staničních kolejí (ovlivňující  $\rho_{max}$ ) a počtem vlaků aktuálně zpracovávaných v *makro-vrcholu*. U tohoto modelu byl zjištěn nárůst *sumárních jízdních dob* sledovaných vlaků cca o 3,3 % oproti výsledkům z mikroskopické simulace (*Tabulka 9*). Bylo vysledováno, že uplatněním modelu provozu založeného na modelu proudění kapaliny „nad“ *makro-vrcholem*, dochází ke zkreslování výstupních rychlostí vlaků (opouštějících *makro-vrchol*) a tedy i k prodlužování jízdních dob vlaků.

O poznání lépe pak byl vyhodnocen makroskopický model provozu založený na modelu sdílených zdrojů, kde byl maximální počet vlaků, který je schopný pojmout daná oblast infrastruktury (zapouzdřená do *makro-vrcholu*), stanoven z počtu staničních kolejí na dané

oblasti infrastruktury (o celkovém počtu 6). Ten dle předepsaného grafikonu vykazoval pouze drobné odchylky vůči výsledkům z výhradně mikroskopické simulace provozu (konkrétně nárůst sumárních jízdních dob činil 1,27 %), a byl tak vybrán pro implementaci v rámci modelu provozu „nad“ *makro-vrcholy*.

### Modely provozu nad makro-hranou

Z pohledu validace makroskopického submodelu provozu „nad“ *makro-hranami* [37] byly zkoumány části širých tratí (zapouzdřené do *makro-hran*) mezi prototypovou a hraničními stanicemi (scénář *Sc03d*). Ověření správnosti se znovu zaměřovalo na odchylky v dosažených sumárních jízdních dobách vlaků projíždějících tentokrát přes *makro-hrany*.

V případě *makro-hran* byl testován makroskopický model provozu založený na modelu sdílených zdrojů, kde byl maximální počet vlaků, který je *makro-hrana* schopná (ve stejné chvíli) pojmout, stanoven z délky vlakové cesty, následného mezidobí a průměrné délky vlaku. Podobně byl testován i přístup založený na modelu proudění kapalin, kdy se hustota dopravního proudu měnila na základě následného mezidobí, délky vlakové cesty a počtu vlaků aktuálně zpracovávaných v *makro-hraně*. U obou implementovaných makroskopických modelů provozu nebyl zjištěn negativní vliv na jízdní dobu vlaků projíždějících přes *makro-hrany*. Konkrétně bylo vysledováno snížení sumárních jízdních dob oproti výsledkům z mikroskopické simulace o 0,23 % u modelu sdílených zdrojů respektive zvýšení o 0,6 % u modelu proudění kapaliny (Tabulka 9). Z důvodu zkreslování výstupních rychlostí vlaků opouštějících *makro-hranu* (pro model proudění kapalin), kde výstupní rychlosti vlaků byly menší oproti mikroskopickému modelu provozu, byl pro *makro-hrany* přijat pouze model provozu založený na sdílených zdrojích (podobně jako v případě *makro-vrcholů*).

Model provozu	Mikroskopický model provozu	Makroskopický model provozu				
		Model proudění kapaliny		Model sdílených zdrojů		
Scénář	<i>Sc01d</i>	<i>Sc02d</i>	<i>Sc03d</i>	<i>Sc02d</i>	<i>Sc03d</i>	<i>Sc04d</i>
Dosažená sumární jízdní doba vlaků [s]	35713	36941 (+3,32 %)	35930 (+0,60 %)	36173 (+1,27 %)	35631 (-0,23 %)	36180 (+1,29 %)

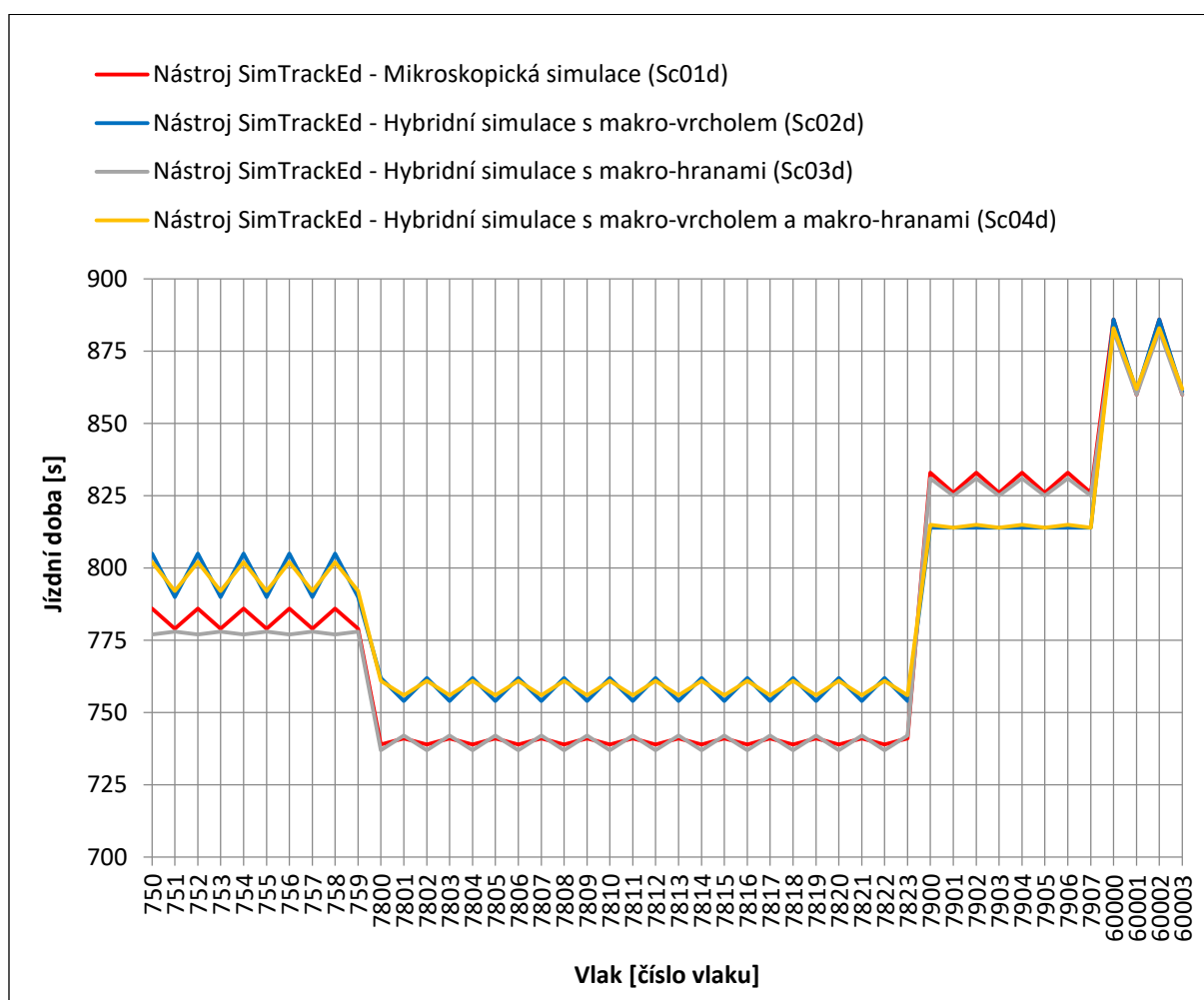
Tabulka 9 - Porovnání sumárních jízdních dob při uplatnění různých makroskopických modelů provozu. Zdroj: vlastní

### Model sdílených zdrojů nad makro-segmenty

Samozřejmě s ohledem na přijatý makroskopický model provozu pro oba typy *makro-segmentů* byla v rámci deterministických simulací prověřována i varianta hybridního modelu provozu nad hybridním modelem infrastruktury, který obsahoval jak *makro-vrchol*, tak i *makro-hrany* (scénář *Sc04d*).



V rámci scénáře *Sc04d* byla prototypová stanice *P* zapouzdřena do *makro-vrcholu* a všechny části širých tratí mezi prototypovou a hraničními stanicemi byly zapouzdřeny do *makro-hran*. Tedy *makro-vrchol* byl incidentní s pěti *makro-hranami* (Obrázek 40) a jednalo se tak o kombinaci dvou předešlých scénářů (*Sc02d* a *Sc03d*). Jediné oblasti modelu infrastruktury, „nad“ kterými byla prováděna mikroskopická simulace provozu, tak byly pouze oblasti hraničních stanic (*A*, *B* a *C*). Oba typy *makro-segmentů* využívaly výše akceptovaný makroskopický model provozu založený na modelu sdílených zdrojů a nebyl u nich dle předpokladu zjištěn zásadní vliv na dosažené sumární jízdní doby všech sledovaných vlaků. Byl zjištěn pouze nepatrný nárůst těchto dob (konkrétně o 1,29 %) oproti výsledku z mikroskopické simulace (tj. oproti scénáři *Sc01d*).



Obrázek 44 - Porovnání jízdních dob v rámci deterministických simulací (mikroskopický model vs. různé variace hybridního modelu. Zdroj: vlastní

Pro důsledné ověření přesnosti implementovaného hybridního modelu provozu v rámci deterministických simulací je uvedena tabulka (Tabulka 10) i příslušný graf (Obrázek 44) obsahující dosažené jízdní doby jednotlivých vlaků pro všechny čtyři sledované scénáře, přičemž v rámci hybridních simulací byl uplatňován model provozu založený na modelu sdílených zdrojů. Rozdíly v jízdních dobách jednotlivých vlaků v případě uplatnění hybridní

simulace oproti výsledkům, kdy se uplatnila na celou infrastrukturu pouze mikroskopická simulace (*Sc01d*), dosahovaly maximálně odchylky  $\pm 3\%$ .

Vlak		750	751	752	753	754	755	756	757	758	759
Jízdní doba [s]	<i>Sc01d</i>	786	779	786	779	786	779	786	779	786	779
	<i>Sc02d</i>	805	790	805	790	805	790	805	790	805	790
	<i>Sc03d</i>	777	778	777	778	777	778	777	778	777	778
	<i>Sc04d</i>	802	792	802	792	802	792	802	792	802	792
Vlak		7800	7801	7802	7803	7804	7805	7806	7807	7808	7809
Jízdní doba [s]	<i>Sc01d</i>	739	741	739	741	739	741	739	741	739	741
	<i>Sc02d</i>	762	754	762	754	762	754	762	754	762	754
	<i>Sc03d</i>	737	742	737	742	737	742	737	742	737	742
	<i>Sc04d</i>	761	756	761	756	761	756	761	756	761	756
Vlak		7810	7811	7812	7813	7814	7815	7816	7817	7818	7819
Jízdní doba [s]	<i>Sc01d</i>	739	741	739	741	739	741	739	741	739	741
	<i>Sc02d</i>	762	754	762	754	762	754	762	754	762	754
	<i>Sc03d</i>	737	742	737	742	737	742	737	742	737	742
	<i>Sc04d</i>	761	756	761	756	761	756	761	756	761	756
Vlak		7820	7821	7822	7823	7900	7901	7902	7903	7904	7905
Jízdní doba [s]	<i>Sc01d</i>	739	741	739	741	833	826	833	826	833	826
	<i>Sc02d</i>	762	754	762	754	814	814	814	814	814	814
	<i>Sc03d</i>	737	742	737	742	831	825	831	825	831	825
	<i>Sc04d</i>	761	756	761	756	815	814	815	814	815	814
Vlak		7906	7907	60000	60001	60002	60003				
Jízdní doba [s]	<i>Sc01d</i>	833	826	886	860	886	860				
	<i>Sc02d</i>	814	814	886	861	886	861				
	<i>Sc03d</i>	831	825	882	860	882	860				
	<i>Sc04d</i>	815	814	883	862	883	862				

Tabulka 10 - Dosažené jízdní doby jednotlivých vlaků pro scénáře *Sc01d*, *Sc02d*, *Sc03d* a *Sc04d* s využitím modelu sdílených zdrojů. Zdroj: vlastní

Provedené deterministické simulační experimenty (Obrázek 44) pro čtyři vybrané odlišné scénáře (*Sc01d*, *Sc02d*, *Sc03d* a *Sc04d*), kdy není železniční provoz zatížen náhodnými zpožděními, potvrdily následující skutečnosti:

- zkoumaný jízdní řád je bezkonfliktní,
- mikroskopický model provozu založený na výpočtu dynamiky jízd jednotlivých vlaků splňuje požadovanou míru přesnosti,
- makroskopický model provozu založený na modelu sdílených zdrojů dosahuje akceptovatelných výsledků v rámci deterministických simulačních experimentů, a na rozdíl od modelu provozu založeného na analogii s prouděním kapaliny, je vhodný pro modelování provozu „nad“ makro-segmenty,
- hybridní model provozu, respektive transformace dopravních proudů na rozhraní mikroskopických a makroskopických součástí hybridního modelu ovlivňují hodnoty jízdních dob vlaků na výstupu ze sledovaného systému pouze minimálně oproti uplatnění pouze mikroskopického modelu provozu.

#### 11.4 Stochastické simulační experimenty

V důsledku komplexní validace unitárního hybridního simulačního modelu bylo nutné zatížit železniční provoz náhodnými zpožděními vlaků (stochastický režim) a sledovat, jak se bude měnit zpoždění vlaků při průjezdu infrastrukturou v rámci všech výše uvedených scénářů (*Sc01s*, *Sc02s*, *Sc03s* a *Sc04s*). V rámci těchto scénářů byly provedeny série 100 replikací s uplatněním náhodných zpoždění vlaků řídicích se parametry uvedenými v tabulce (Tabulka 7). Nejdůležitějším sledovaným indikátorem je *SWDI* (suma vážených přírůstků zpoždění všech vlaků) respektive *meanSWDI*, kdy se pro statistické vyhodnocení provozu využil aritmetický průměr z *SWDI* hodnot všech replikací příslušejících k danému scénáři.

##### 11.4.1 Mikroskopický model provozu

Prvotní testování bylo zaměřeno na validaci mikroskopického modelu provozu a to porovnáním jízdních dob respektive přírůstků zpoždění dosažených v již validovaném simulátoru *Villon* (podobně jako tomu bylo v případě deterministického režimu). Z důvodu zatížení železničního provozu náhodnými zpožděními, bylo v nástroji *Villon* pro řešení konfliktů (přidělování staničních kolejí v rámci prototypové stanice *P*) využito statické prioritní plánování, které odpovídalo plánu přidělování kolejí v nástroji *SimTrackEd* (Tabulka 6).

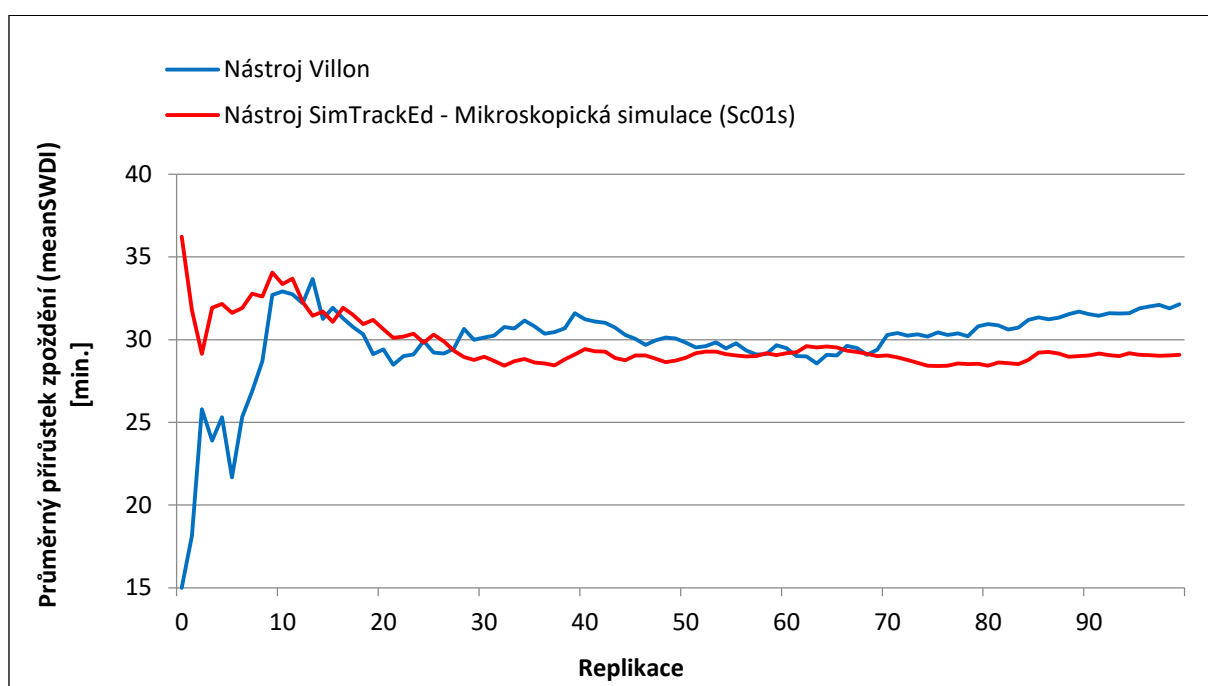
Simulační nástroj	<i>meanSWDI</i> ± <i>halfWidth</i>
<i>Villon</i>	32,1 ± 3,7 min.
<i>SimTrackEd</i> ( <i>Sc01s</i> )	29,1 ± 1,9 min.

Tabulka 11 - Porovnání dosažených hodnot indikátoru *meanSWDI*. Zdroj: vlastní

Ačkoliv byl zaznamenán rozdíl v hodnotách indikátoru *meanSWDI* (Tabulka 11) mezi oběma zmíněnými simulačními nástroji odpovídající asi 9,4 %, stále lze dosaženou hodnotu

v simulátoru *SimTrackEd* (s ohledem na zaměření simulačního nástroje a jeho aplikovanou úroveň abstrakce v případě mikroskopické simulace provozu) hodnotit jako akceptovatelnou (Obrázek 45). Limitní hranice byla expertně stanovena na 10 % až 15 %. Důvodem je zatížení železničního provozu náhodnými zpožděními vlaků, při kterém vznikají konfliktní situace, přičemž jejich řešení může být v rámci obou nástrojů odlišné. Obecně lze mikroskopický model provozu v nástroji *SimTrackEd*, zejména z důvodu uplatnění vyšší míry abstrakce oproti nástroji *Villon*, považovat za mírně optimistický (vzhledem k dosahovaným hodnotám přírůstků zpoždění vlaků).

Pro hodnocení hybridního modelu provozu v rámci scénářů *Sc02s*, *Sc03s* a *Sc04s* bylo možné využít (pro potřeby komparace) již zjištěnou hodnotu *meanSWDI* ze scénáře *Sc01s*, který uplatňoval pouze mikroskopickou úroveň podrobnosti.



Obrázek 45 - Porovnání průměrných sumárních vážených přírůstků zpoždění (*meanSWDI*) v rámci stochastické mikroskopické simulace v nástrojích *SimTrackEd* a *Villon*. Zdroj: vlastní

#### 11.4.2 Hybridní model provozu

V další fázi validace proběhlo porovnávání hodnot výše uvedených ukazatelů za použití *makro-segmentů* a to vůči výsledkům dosažených při použití simulačního modelu pracujícího výhradně na mikroskopické úrovni podrobnosti. Pro tyto účely bylo nutné stanovit pro oba typy *makro-segmentů* jejich maximální kapacitu (tj. hodnoty atributů  $K_{M,Od,Do}$ ) pro vybrané makroskopické modely provozu založené na konceptu sdílených zdrojů.

#### Makro-vrchol

V případě *makro-vrcholu* byla stanovena tzv. *směrová tabulka* sdílených zdrojů (Tabulka 12). Směrová tabulka určuje konkrétní rozdělení sdílených zdrojů (staničních kolejí) v *makro-vrcholu* dle statického plánu přidělování staničních kolejí, který byl specifikovaný

pro prototypovou stanicí  $P$  (Tabulka 6). Jinými slovy, dle reálného provozu v železniční stanici  $P$ , bylo potřeba rozčlenit dopravní staniční koleje dle směrů. V rámci mikroskopického modelu provozu totiž dochází k výběru alternativní vlakové cesty přes železniční stanici v případech, kdy je primární cesta postavena/blokována jiným vlakem.

Kategorie dopravy	Směr Od	Směr Do	Sdílené zdroje				Maximální kapacita
Dálková	$A$	$B$	$S_{2,A,B}$	$S_{4,A,B}$	$S_{1,A,B}$	$S_{3,A,B}$	$K_{P,A,B} = 6$
Regionální	$A$	$B$	$S_{2,A,B}$	$S_{4,A,B}$	$S_{1,A,B}$	$S_{3,A,B}$	
Nákladní	$A$	$B$	$S_{2,A,B}$	$S_{4,A,B}$	$S_{6,A,B}$	$S_{8,A,B}$	
Dálková	$B$	$A$	$S_{1,B,A}$	$S_{3,B,A}$	$S_{2,B,A}$	$S_{4,B,A}$	$K_{P,B,A} = 6$
Regionální	$B$	$A$	$S_{1,B,A}$	$S_{3,B,A}$	$S_{2,B,A}$	$S_{4,B,A}$	
Nákladní	$B$	$A$	$S_{1,B,A}$	$S_{2,B,A}$	$S_{6,B,A}$	$S_{8,B,A}$	
Regionální	$A$	$C$	$S_{2,A,C}$	$S_{4,A,C}$	$S_{1,A,C}$	$S_{3,A,C}$	$K_{P,A,C} = 4$
Regionální	$C$	$A$	$S_{3,C,A}$	$S_{1,C,A}$	$S_{2,C,A}$	$S_{4,C,A}$	$K_{P,C,A} = 4$

Tabulka 12 - Směrová tabulka pro makro-vrchol  $P$ . Zdroj: vlastní

V rámci každé z výše uvedených skupin sdílených zdrojů byla automaticky spočítána (ze zapouzdřených mikroskopických elementů) průměrná délka vlakové cesty (Tabulka 13), která je příslušným způsobem přidělena každému zpracovávanému vlaku v makro-vrcholu. Délka příslušné cesty se využila pro výpočty uvedené ve vztazích (7) a (8).

Průměrná délka vlakových cest [m]
$\bar{D}_{P,A,B} = 2723,4$
$\bar{D}_{P,B,A} = 3163,5$
$\bar{D}_{P,A,C} = 2721,4$
$\bar{D}_{P,C,A} = 2008,5$

Tabulka 13 - Průměrná délka vlakových cest v makro-vrcholu  $P$ . Zdroj: vlastní

### Makro-hrana

Z pohledu makro-hran a definování maximálních kapacit (tj. hodnot atributů  $K_{M,Od,Do}$ ) bylo důležité zvolit správný minimální rozestup jednotlivých vlaků. Pro výpočet minimálního rozestupu jednotlivých vlaků (a tedy i následného mezidobí) byla využita tabulka zábrzdných vzdáleností (Tabulka 14) stanovená dle oficiálních předpisů od společnosti SŽ, s.o. [51].

Vzdálenost [m]	Rychlost [km/h]
400	60
700	100
1000	160

Tabulka 14 - Zábrzdné vzdálenosti pro makro-hranu. Zdroj:[51]

Z pohledu případové studie byla hodnota minimálního rozestupu jednotlivých vlaků pro každou makro-hranu stejná. Samozřejmě však platí, že principiálně může být hodnota

minimálního rozestupu jednotlivých vlaků pro odlišné *makro-hrany* různá, protože je závislá na průměrné rychlosti definované na konkrétních zapouzdřených elementech tvořících vlakovou cestu.

V rámci každé *makro-hrany* byla automaticky spočítána (ze zapouzdřených mikroskopických elementů) délka vlakové cesty (*Tabulka 15*). Avšak jelikož je výběr oblastí (částí širých tratí) určených pro zapouzdření do *makro-hran* výhradně na designérovi příslušných simulací a výběr se provádí s ohledem na technické a technologické aspekty (například předvěst vjezdového návěstidla) může dojít k situaci, že dvě *makro-hrany* zapouzdřující dvoukolejnou trať, obsahují jiné délky vlakových cest.

Směr Od	Směr Do	Délka vlakové cesty [m]
<i>A</i>	<i>P</i>	6148,0
<i>P</i>	<i>A</i>	7563,9
<i>B</i>	<i>P</i>	7845,0
<i>P</i>	<i>B</i>	9017,0
<i>C</i>	<i>P</i>	7351,8
<i>P</i>	<i>C</i>	

*Tabulka 15 - Délka vlakových cest v makro-hranách. Zdroj: vlastní*

### Výsledky ze stochastických simulačních experimentů

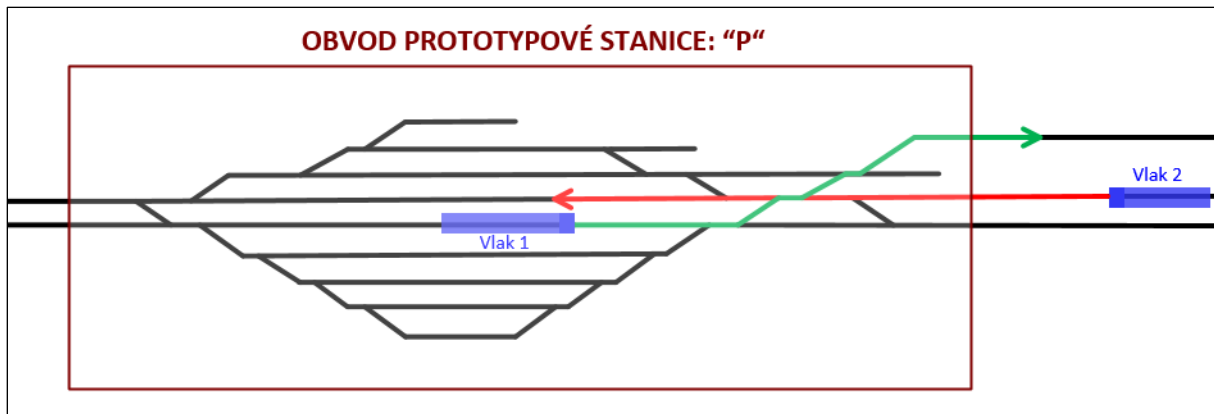
Z pohledu jednotlivých scénářů zaměřených na stochastické simulace (s náhodnými zpožděními vlaků) s využitím hybridního modelu provozu byla hlavní sledovanou hodnotou, vypovídající o charakteru provozu, opět hodnota indikátorů *meanSWDI* (*Tabulka 16*). Dále byly sledovány i hodnoty indikátorů *minSWDI* a *maxSWDI*, které odpovídají minimální respektive maximální hodnotě všech naměřených hodnot indikátoru *SWDI* pro jednotlivé replikace. Konfigurace hybridního modelu infrastruktury byla konstruována shodně s tím, jaké byly varianty hybridních modelů kolejíšť v případě odpovídajících deterministických scénářů (*Obrázek 40*).

Simulační nástroj (scénář)	<i>meanSWDI</i> ± <i>halfWidth</i>	<i>minSWDI</i>	<i>maxSWDI</i>
<i>SimTrackEd (Sc01s)</i>	29,1 ± 1,9 min.	12,2 min.	60,5 min.
<i>SimTrackEd (Sc02s)</i>	25,0 ± 1,1 min.	15,2 min.	51,5 min.
<i>SimTrackEd (Sc03s)</i>	27,1 ± 2,1 min.	10,9 min.	63,5 min.
<i>SimTrackEd (Sc04s)</i>	27,4 ± 1,7 min.	14,3 min.	55,8 min.
<i>Villon</i>	32,1 ± 3,7 min.	5,9 min.	92,0 min.

*Tabulka 16 - Charakter provozu v rámci stochastických simulací vyjádřený indikátorem meanSWDI. Zdroj: vlastní*

U scénáře využívajícího zapouzdření pouze železniční stanice do *makro-vrcholu* (scénář *Sc02s*) bylo zjištěno snížení průměrného úhrnného přírůstku zpoždění na replikaci (tj. hodnoty *meanSWDI*) o 4,1 minuty oproti scénáři *Sc01s*, který aplikoval pouze

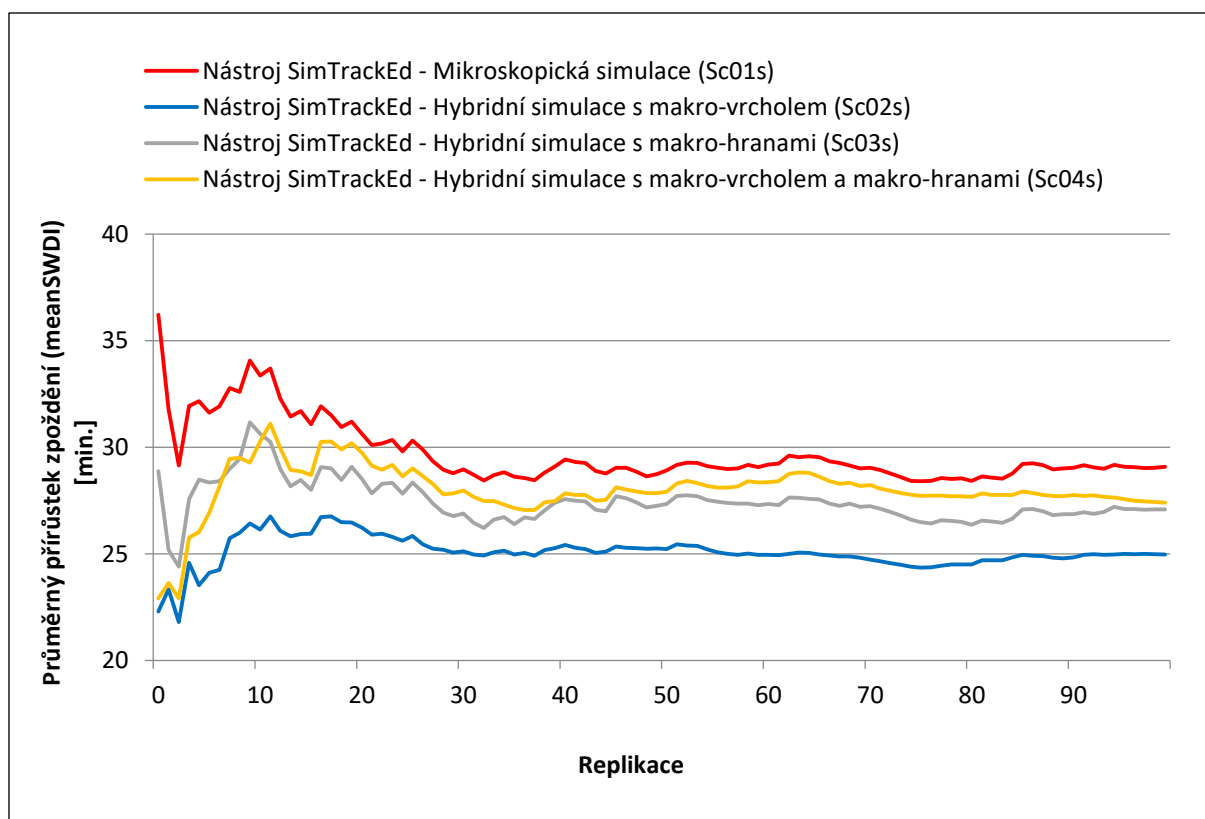
mikroskopickou simulaci. To znamená, že průměrný úhrný přírůstek zpoždění na replikaci je u scénáře *Sc02s* o 16 % nižší, než u scénáře *Sc01s*. Tato odchylka může být způsobena tím, že v mikroskopickém submodelu provozu může při jízdě vlaku ke staniční koleji docházet k obsazení části zhlaví (tj. kolejového rozvětvení), které může pozdržet ostatní vlaky vstupující/opouštějící železniční stanici (Obrázek 46), tj. makroskopický model provozu se v této situaci „chová“ optimisticky.



Obrázek 46 - Ilustrace konfliktu mezi vlaky na zhlaví v železniční stanici. Zdroj: vlastní

U scénáře *Sc03s* využívajícího zapouzdření pouze částí širých tratí do *makro-hran* došlo ke snížení průměrného přírůstku zpoždění na replikaci o 7 % vůči scénáři *Sc01s*, který aplikoval pouze mikroskopickou simulaci. To může být způsobeno uplatněním odlišné logiky v submodelech provozu (makroskopický oproti mikroskopickému) v případech, kdy vlak musí čekat před plně obsazenou železniční stanicí. Pokud se jedná o mikroskopický model provozu, ve kterém vlak musí čekat před plně obsazenou železniční stanicí (tj. všechny přípustné vlakové cesty jsou v daný okamžik obsazeny), dochází k brzdění vlaku a to někdy až do jeho úplného zastavení. V případě, že následně dojde k uvolnění některé z dostupných vlakových cest, musí vlak naopak začít znovu akcelarovat. Pokud stejná situace, kdy je železniční stanice (v následném submodelu) plně obsazena, nastane pro vlak zpracováváný v rámci makroskopického modelu provozu, dochází z pohledu vlaku jen k přepočtu hodnoty časového okamžiku pro zahájení požadavku o obsazení následného submodelu (tj. hodnoty atributu  $^{alloc}t_{M,Do}(v_i)$ ). Tento přepočet tohoto časového okamžiku tedy nemusí zcela věrně odrážet dobu, kterou vlak ve stejné situaci v rámci mikroskopického modelu provozu ztratí během brzdění a opětovné akceleraci. Avšak s ohledem na použitou míru abstrakce v případě makroskopického submodelu provozu je toto zkrácení akceptovatelné.

Posledním testovaným scénářem byl *Sc04s*, kde byla prototypová stanice *P* zapouzdřena do *makro-vrcholu* a všechny přilehlé širé tratě vedoucí do hraničních stanic (*A*, *B* a *C*), byly zapouzdřeny do *makro-hran*. Mikroskopický model provozu byl aplikován „nad“ oblastmi modelu infrastruktury, které zahrnovaly pouze hraniční stanice. Dosažená hodnota průměrného váženého přírůstku sumárního zpoždění na replikaci byla o 6 % nižší, než u scénáře *Sc01s* uplatňujícího pouze mikroskopický model provozu „nad“ celým modelem infrastruktury.



Obrázek 47 - Porovnání průměrných přírůstků zpoždění v rámci stochastických simulací (mikroskopický model vs. různé variace hybridního modelu). Zdroj: vlastní

I přes zjištěné odchylky v průměrných přírůstcích sumárního zpoždění (Obrázek 47) lze hybridní model železničního provozu (v případě všech uvedených scénářů) pro konkrétní případovou studii železničního provozu vybrané oblasti železniční sítě ČR považovat za validní. Průměrný přírůstek zpoždění se v rámci scénářů, které uplatňovaly pouze hybridní model provozu, lišil od scénáře (*Sc01s*), který uplatňoval čistě mikroskopický model provozu, průměrně o 9,7 %. Dosažený výsledek lze považovat za akceptovatelný, protože nepřekročil expertně stanovenou limitní hranici 10 % až 15 %, která byla stanovena s ohledem na vysokou míru abstrakce, která je na makroskopické simulační modely kladena.

### Hodnocení kvality železničního provozu

V rámci stochastických simulačních experimentů byla posuzována i dosažená kvalita železničního provozu na dané oblasti železniční sítě a to s ohledem na směrnici *SM124* [66]. Hlavním účelem bylo posouzení naměřené kvality železničního provozu s využitím hybridního modelu v simulátoru *SimTrackEd*, vzhledem k dosaženým výsledkům v simulátoru *Villon*. Směrnice *SM124* obsahuje postupy (využívané v praxi) pro zjišťování kapacity kolejí, kdy je možné ohodnotit kvalitu provozu ve vybrané oblasti infrastruktury za pomoci hodnot přírůstků zpoždění dosažených v rámci počítačové simulace. Prvořadý význam mají průměrné hodnoty těchto přírůstků v rozdělení na dálkovou, regionální a nákladní dopravu, přičemž jsou stanoveny limitní hodnoty, které vyjadřují, zda se jedná o optimální, rizikovou nebo nevyhovující úroveň kvality provozu. Hodnocení kvality provozu



se provádí zejména za účelem posouzení, zda je příslušná oblast infrastruktury vhodně dimenzována na současné počty jízd.

Úroveň kvality provozu	Dálková doprava	Regionální doprava	Nákladní doprava
Optimální	≤ 0 min.	≤ 0 min.	≤ 1 min.
Riziková	0 – 1 min.	0 – 2 min.	1 – 5 min.
Nevyhovující	> 1 min.	> 2 min.	> 5 min.

Tabulka 17 - Limitní hodnoty přírůstků zpoždění pro klasifikaci kvality provozu. Zdroj: SŽ s.o.

Hlavním hodnotícím ukazatelem byl průměrný přírůstek zpoždění na jeden vlak pro dálkovou, regionální a nákladní dopravu, které byly naměřeny jednak v simulátoru *Villon* a jednak v simulátoru *SimTrackEd*. Z dosažených hodnot byla následně stanovena kvalita provozu s ohledem na limitní hodnoty přírůstků zpoždění (Tabulka 17), které jsou specifikované ve směrnici *SM124*. I přes rozdíly mezi naměřenými hodnotami průměrného přírůstku zpoždění na jeden vlak (Tabulka 18) mezi nástroji *SimTrackEd* a *Villon*, bylo dosaženo v obou nástrojích shodných hodnot vyjadřujících kvalitu provozu v simulované oblasti. Z dosažených výsledků bylo potvrzeno, že pro zjišťování kvality provozu ve zkoumané oblasti, se může využívat i hybridní simulační model.

Kategorie dopravy	Průměrná hodnota přírůstku zpoždění na jeden vlak [min]				
	<i>Villon</i>	<i>SimTrackEd (Sc01s)</i>	<i>SimTrackEd (Sc02s)</i>	<i>SimTrackEd (Sc03s)</i>	<i>SimTrackEd (Sc04s)</i>
Dálková	0,48 (riziková)	0,40 (riziková)	0,41 (riziková)	0,30 (riziková)	0,34 (riziková)
Regionální	0,73 (riziková)	0,56 (riziková)	0,45 (riziková)	0,56 (riziková)	0,45 (riziková)
Nákladní	0,09 (optimální)	0,49 (optimální)	0,14 (optimální)	0,31 (optimální)	0,38 (optimální)

Tabulka 18 - Odvození kvality provozu z hodnoty přírůstků zpoždění dle směrnice *SM124*.  
Zdroj: vlastní

### Přípustná míra abstrakce v rámci makro-segmentů

Z pohledu dosažených výsledků hybridního modelu provozu v rámci různých stochastických simulací je zejména důležité, jak byly nastaveny hodnoty jednotlivých statických atributů v rámci příslušných *makro-segmentů*. Například atributy jako maximální kapacita submodelu (tj. počet sdílených zdrojů), průměrná délka vlakových cest přes submodel a minimální rozestup vlaků, byly stanoveny tak, aby co nejdříve kopírovaly příslušné chování (pohyb) vlaku v mikroskopické simulaci provozu nad stejnou oblastí infrastruktury. Avšak z pohledu hodnot těchto atributů bude záležet výhradně na designérovi simulačních modelů, jakou úroveň abstrakce použije v rámci *makro-segmentů*. Důvodem může být to, že designér nemusí disponovat přesnými informacemi o dané oblasti infrastruktury. Samozřejmě v těchto případech může dojít ke změnám odchylek v jízdních dobách či ke změně zpoždění vlaků oproti čistě mikroskopické simulaci.

Prvním příkladem, týkajícím se alternativního nastavení atributů simulační scény, může být směrová tabulka (*Tabulka 12*) definovaná pro *makro-vrcholy*, která vyjadřuje rozdělení sdílených zdrojů (staničních kolejí) například dle statického plánu přidělování staničních kolejí pro danou železniční stanici. Z pohledu uplatnění vyšší míry abstrakce nad *makro-segmenty* je plně na designérovi, zda vůbec budou tyto sdílené zdroje v *makro-vrcholu* rozděleny dle směrů a také, jakým způsobem budou tyto směry nadefinovány. Tedy například maximální kapacita *makro-vrcholu* pro jakýkoli směr může být dána počtem všech sdílených zdrojů (tj. počtem všech staničních kolejí) bez ohledu na statický plán přidělování staničních kolejí. V této souvislosti je však nutné zohlednit fakt, že může docházet k blokování *makro-vrcholu* vlaky přijíždějícími pouze z jednoho směru a to samozřejmě může vést k nárůstu zpoždění u vlaků v ostatních směrech.

Druhým příkladem může být odlišný přístup k nastavení průměrných délek vlakových cest, které jsou definovány v rámci *makro-vrcholu*. Jejich hodnota může být stanovena například jako průměr ze všech přípustných vlakových cest v rámci dané železniční stanice a podobně. Tedy pro uvedenou prototypovou stanici *P*, jejíž průměrné délky vlakových cest pro každý směr jsou definovány (*Tabulka 13*), může být alternativně pro všechny směry stanovena stejná hodnota, která odpovídá hodnotě jejich průměru, tedy 2654,2 m. To samozřejmě znamená, že vlaky v některých směrech mohou mít kratší nebo naopak delší jízdní doby v rámci *makro-vrcholu* oproti jejich reálnému pohybu na dané části infrastruktury.

Další příklad alternativního nastavení atributů simulační scény se může týkat hodnoty minimálního rozestupu vlaků, která je součástí zejména výpočtu maximálního přípustného počtu vlaků, který pojme *makro-hrana*. Tento minimální rozestup nemusí vycházet z tabulky zábrzdných vzdáleností (*Tabulka 14*), ale může být určen explicitně. Pomocí explicitního určení lze ovlivnit kapacitu *makro-hran*, a lze tak například modelovat princip jízdy vlaků na širé trati v prostorových oddílech (*makro-hranách*) a podobně.

## 12 Závěr

Práce se zaměřovala na aktuální problematiku inovativních řešení v oblasti modelování a simulace rozsáhlých a komplexních systémů železniční dopravy, a během jejího zpracování bylo dosaženo všech vytyčených cílů.

Hlavním tématem práce byl návrh metodiky pro budování škálovatelných simulačních modelů železničního provozu. Tyto simulační modely umožňují kombinovat a propojovat různé submodely infrastruktury, které uplatňují odlišnou míru abstrakce, nad nimiž se aplikují příslušné submodely provozu. V rámci simulačních experimentů je možné se zaměřit na detailní zkoumání pouze úzkých provozních míst příslušné železniční sítě a pro ostatní oblasti aplikovat pouze hrubší úroveň zkoumání.

Popis navržené metodiky v rámci práce je členěn do částí vysvětlujících jednotlivé fáze metodického přístupu k výstavbě škálovatelného modelu železničního provozu, ve kterých je věnována pozornost:

- konstrukci mikroskopického modelu infrastruktury,
- implementaci mikroskopického submodelu provozu,
- konstrukci hybridního modelu infrastruktury,
- implementaci makroskopického submodelu provozu,
- transformaci dopravního proudu na rozhraní odlišných submodelů provozu,

Výsledný hybridní model železničního provozu byl ověřován na případové studii odrážející reálnou část železniční sítě v ČR.

V rámci práce byla nejdříve navržena metodika konstrukce hybridního modelu železniční infrastruktury a to za pomoci matematického modelu graf. Ten vychází z mikroskopického modelu infrastruktury, nad kterým jsou pomocí tzv. *makro-segmentů* vytvářeny oblasti aplikující nižší úroveň podrobnosti.

Pro příslušné simulace bylo nutné navrhnout vhodný způsob vizualizace modelu železniční sítě i pohybujících se vlaků. Další stěžejní částí práce byl návrh koncepce dopravních simulací uplatněných v submodelech provozu s různou úrovní podrobnosti a v neposlední řadě bylo nutné navrhnout a zhodnotit metodiku simulace provozu na rozhraní těchto odlišných submodelů (transformace dopravních toků). V závěrečné části práce byla provedena aplikace navrženého způsobu řešení na modely vybraného segmentu reálné železniční sítě ČR, posouzení dosažených výsledků a porovnání s výsledky z klasických mikroskopických simulačních modelů.

Pro experimentální potřeby byly navržené přístupy ilustrovány v softwarovém demonstrátoru zaměřeném na budování a experimentování s hybridními simulačními modely. Softwarový demonstrátor mimo jiné disponuje funkcionalitami pro definici úrovní detailů jednotlivých submodelů před zahájením simulace.

## 12.1 Přínosy práce

Mezi hlavní přínosy práce lze zařadit samotný návrh metodiky *ScalRail* budování škálovatelného simulačního modelu železničního provozu. Tato metodika zahrnuje vytvoření hybridního modelu, kombinujícího submodely infrastruktury aplikující mikroskopickou nebo makroskopickou úroveň podrobnosti, nad kterými jsou uplatněny příslušné submodely provozu. Výsledkem je škálovatelný simulátor umožňující měnit granularitu pouze některých jeho částí, který je zároveň implementovatelný pouze v rámci jednoho simulačního nástroje.

V rámci případové studie bylo ověřeno úspěšné nasazení navrhovaného hybridního modelu železničního provozu. Hodnoty provozních indikátorů (celkových jízdních dob vlaků, anebo úhrnných vážených přírůstků zpoždění), které byly dosaženy při různých konfiguracích hybridního modelu železničního provozu, totiž nepřekračovaly expertně stanovené limitní hodnoty odchylek vzhledem k výsledkům dosažených v čistě mikroskopickém simulátoru využívaného v praxi. Dále bylo ověřeno, že se pro šetření zabývající se zjišťováním kvality provozu ve zkoumané oblasti nemusí využívat například čistě mikroskopický simulační model, ale lze využít i ten hybridní.

Navržené postupy jsou vhodné pro designéry dopravních simulací, kteří chtějí detailně zkoumat železniční provoz pouze na části železniční sítě, ale přesto chtějí do simulačního modelu přidat i vliv provozu v okolních oblastech. V rámci těchto okolních oblastí lze aplikovat vyšší míru abstrakce, tedy během simulačních experimentů postačuje monitorovat jen infrastrukturu, tak železniční provoz na nižší úrovni podrobnosti.

## 12.2 Perspektivy dalšího vývoje

Představená metodika je založena na dostupnosti mikroskopického modelu infrastruktury celé zkoumané železniční sítě. Tedy další vývoj může být směřován k možnostem výstavby hybridního modelu infrastruktury bez nutnosti vytvářet mikroskopický model celé zkoumané železniční sítě. Rozšíření umožní modelovat a propojovat odlišné submodely infrastruktury (mikroskopické a makroskopické), kde pro makroskopické submodely infrastruktury bude možné definovat pouze hrubé charakteristiky kolejiště, které jsou nezbytné pro příslušný makroskopický submodel provozu.

Další možností je rozšíření představené metodiky o přístupy, kde se *makro-hrany* vytvořené nad vícekolejnou širou tratí zapouzdří do jedné agregované *makro-hrany*. S tím je samozřejmě spojena i potencionální úprava příslušného modelu provozu uplatněného v *makro-hranách*.

Další perspektivní možností může být rozšíření unitárního hybridního modelu o mezoskopické oblasti. V případě mezoskopického submodelu infrastruktury by byla aplikována vyšší míra podrobnosti, než je u oblastí makroskopických. Samozřejmě s tím je spjat i potenciální návrh mezoskopického submodelu provozu, který by byl aplikován „nad“ příslušnými mezoskopickými submodely infrastruktury, v rámci kterého by docházelo ke

sledování jednotlivých vlaků a jejich interakcí, avšak byla by uplatněna vyšší míra abstrakce, než je v případě mikroskopického submodelu provozu.

Existuje i potenciál rozšířit funkcionality editoru o automatickou transformaci navrženého modelu respektive jeho vizuálního schématického plánu (prvotně vybudovaného uživatelem) na plán v reálném měřítku a to s využitím reálných metrických poměrů v *datové* vrstvě. Přínos tohoto transformovaného modelu by byl hlavně pro uživatele provádějícího simulační experimenty a to pro lepší představu o skutečných metrických vlastnostech za scénou (do značné míry eliminuje vliv deformované infrastruktury na animaci pohybu vlaku).

Poslední perspektivou do budoucna je umožnit importovat geografický plán v měřítku (jako například v nástroji *Villon*), který se v softwarovém demonstrátoru *TrackEd* převede do schématického plánu s reálnými údaji o kolejišti v *datové* vrstvě.

## Seznam použité literatury

- [1] CUI, Yong a Ullrich MARTIN. Multi-scale Simulation in Railway Planning and Operation. *PROMET – Traffic & Transportation* [online]. 2011, 23(6), - [cit. 2020-07-27]. DOI: 10.7307/ptt.v23i6.186. ISSN 1848-4069. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/292468667\\_Multi-scale\\_simulation\\_in\\_railway\\_planning\\_and\\_operation](https://www.researchgate.net/publication/292468667_Multi-scale_simulation_in_railway_planning_and_operation)
- [2] GILLE, A., KLEMENZ, M. a Th. SIEFER. Multiscaling Analysis. UIC [online]. Germany, 2008, : 12 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/o.2.1.2.2.pdf>
- [3] BURGHOUT, Wilco. *Hybrid microscopic-mesoscopic traffic simulation* [online]. Sweden, 2004, [cit. 2020-07-27]. Doctoral Dissertation. Royal Institute of Technology. Dostupné z: <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:14700/FULLTEXT01.pdf>
- [4] BURGHOUT, W., H.N. KOUTSOPOULOS a I. ANDREASSON. A discrete-event mesoscopic traffic simulation model for hybrid traffic simulation. In: *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference* [online]. IEEE, 2006, 2006, s. 1102-1107 [cit. 2020-07-27]. DOI: 10.1109/ITSC.2006.1707369. ISBN 1-4244-0093-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1707369/>
- [5] BOURREL, E. A J.B. LESORT. Mixing Micro and Macro Representations of Traffic Flow: A Hybrid Model Based on the LWR Theory. *Transportation Research Board*. Washington DC, 2003.
- [6] KETTNER, Michael, SEWCYK, Bernd a Carla EICKMANN. Integrating microscopic and macroscopic models for railway network evaluation. *Association for European Transport* [online]. Germany, 2003: 11 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/581.pdf>
- [7] DAIHENG, Ni. Multiscale modeling of traffic flow. *Mathematica Aeterna* [online]. 2011, 2011(1): 28 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://people.umass.edu/ndh/Publications/J23.pdf>
- [8] CASAS, Jordi, Josep PERARNAU a Alex TORDAY. The need to combine different traffic modelling levels for effectively tackling large-scale projects adding a hybrid meso/micro approach. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* [online]. 2011, 20, 251-262 [cit. 2018-09-27]. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.08.031. ISSN 18770428. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187704281101411X>
- [9] HARTMAN, D. Testing Of Juts System And Construction Of Hybrid Traffic Simulation Model. In: *ECMS 2006 Proceedings edited by: W. Borutzky, A. Orsoni, R. Zobel* [online].

- ECMS, 2006, 2006-05-28, s. 214-219 [cit. 2020-07-27]. DOI: 10.7148/2006-0214. ISBN 0955301807. Dostupné z: <http://www.scs-europe.net/dlib/2006/2006-0214.htm>
- [10] ANH, Nguyen Thi Ngoc, Zucker Jean DANIEL, Nguyen Huu DU, Alexis DROGOUL a Vo Duc AN. *A Hybrid Macro-Micro Pedestrians Evacuation Model to Speed Up Simulation in Road Networks*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, s. 371-383 [cit. 2020-07-27]. DOI: 10.1007/978-3-642-27216-5\_28. ISBN 978-3-642-27215-8. Dostupné z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-27216-5\\_28](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-27216-5_28)
- [11] HARTMAN, David. *Switching of scalability of hybrid model for complex traffic simulations*. Pilsen, 2008. Doctoral Dissertation. University of West Bohemia.
- [12] SCHLECHTE, Thomas, Ralf BORNDÖRFER, Berkan EROL, Thomas GRAFFAGNINO a Elmar SWARAT. Micro–macro transformation of railway networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*[online]. 2011, 1(1), 38-48 [cit. 2020-07-27]. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2011.09.001. ISSN 22109706. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210970611000047>
- [13] HANSEN, Ingo a Jorn PACHL. *Railway Timetabling & Operations: Analysis, Modelling, Optimisation, Simulation, Performance Evaluation*. 1. Hamburg: Eurailpress, 2008. ISBN 978-3777104621.
- [14] FIKEJZ, Jan. *Systém na podporu dispečerského řízení železniční dopravy analyzující data o poloze kolejových vozidel získaných ze systémů GNSS* [online]. Pardubice, 2016 [cit. 2020-07-27]. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Dostupné z: <https://theses.cz/id/8gfk8g/>.
- [15] SIMCON. *Villon*. Simcon, 2014. Dostupné z: <http://www.simcon.sk/en/tools/villon>
- [16] RADTKE, Alfons, BENDFELT, Jan-Philipp, 2011. Handling of railway operation problems with RailSys. *Institute of Transport, University of Hanover* [online]. Dostupné z: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/235.pdf>
- [17] HUERLIMANN, Daniel a Andrew NASH. OpenTrack - Simulation of Railway Networks: User's Manual Version 1.6. *ETH Zurich: Institute for Transportation Planning and Systems*. Zurich, 2010.
- [18] MONTERO, L., CODINA, E., BARCELO, P. a J. BARCELO. Combining macroscopic and microscopic approaches for transportation planning and design of road networks. *Transportation Research C*[online]. 2001(9): 15 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: [https://www.inrosoft.com/assets/pres-pap/international/ieug98/octet\\_stream7.pdf](https://www.inrosoft.com/assets/pres-pap/international/ieug98/octet_stream7.pdf)
- [19] MAGNE, Laurent, RABUT, Sylvestre a Jean-Francois GABARD. Towards an hybrid macro-micro traffic flow simulation model. *Infoms String Conference* [online]. Salt

- Lake City, 2000, 2000: 7 [cit. 2018-09-27]. Dostupné z:  
[http://www.researchgate.net/publication/237560732\\_Towards\\_an\\_hybrid\\_macro-micro\\_traffic\\_flow\\_simulation\\_model](http://www.researchgate.net/publication/237560732_Towards_an_hybrid_macro-micro_traffic_flow_simulation_model)
- [20] NOVOTNÝ, R. a Antonín KAVIČKA. Model of railway infrastructure as a part of mesoscopic traffic simulator. In *27th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2015*. Janov: University of Genoa, 2015. s. 120-126. ISBN 978-88-97999-48-5.
- [21] VILARO, Jordi Casas, Alexandre TORDAY a A GERODIMOS. Combining Mesoscopic and Microscopic Simulation in an Integrated Environment as a Hybrid Solution. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* [online]. 2010, 2(3), 25-33 [cit. 2020-07-27]. DOI: 10.1109/MITS.2010.939217. ISSN 1939-1390. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/5668156/>
- [22] KŘIVÝ, I. a Evžen KINDLER. *Simulace a modelování*. Ostrava : Ostravská Univerzita, 2001. 146s
- [23] GAŠPAŘÍK, J. a Jiří KOLÁŘ. *Železniční doprava: technologie, řízení, grafiky a dalších 100 zajímavostí*. Praha: Grada Publishing, 2017. ISBN 978-80-271-0058-3.
- [24] CORMEN, H., LEISERSON, E., RIVEST, L. a C. Stein. *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 2011. ISBN 0-262-03293-7.
- [25] JIRSÁK, Z. *Železničné stanice a uzly*. Bratislava Praha: Alfa, 1979, 481s.
- [26] KUBÁT, B. a T. FLIEGEL. *Železniční stavby 30*. Praha: CVUT, 1999, 162s.
- [27] CENEK, Petr. *Řízení dopravních procesů v logistických systémech*. AT&P journal. 2004, 2004(9), 13-15.
- [28] SEWCYK, Bernd a Kettner MICHAEL. Network Evaluation Model NEMO. *Institute of Transport* [online]. Germany: University of Hanover, 2001, 5 [cit. 2020-07-27]. Dostupné z: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/014.pdf>
- [29] VIA. *LUKS – Analysis of lines and junctions*. Via, 2014. Dostupné z: <http://www.via-con.de/en/development/luks>
- [30] KAVIČKA, Antonín a Michael BAŽANT. *Návrh infrastruktury železničních uzlů s podporou počítačové simulace: část 1*. Automa. 2007, 2007(5).
- [31] KAVIČKA, Antonín a Michael BAŽANT. *Návrh infrastruktury železničních uzlů s podporou počítačové simulace: část 2*. Automa. 2007, 2007(6).



- [32] ETAP. *eTraX – Train Power Simulation*. Etap, 2015. Dostupné z: <http://etap.com/etrax-railway-traction-systems/etrax-railway-traction-power-software.html>
- [33] BOMBARDIER. *EnerGplan Simulation Tool*. Bombardier, 2015. Dostupné z: <http://www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BT/Bombardier-Transportation-ECO4-EnerGplan.pdf>
- [34] NOVOTNÝ, Radek a Antonín KAVIČKA. Scalable simulation models of railway traffic. In *28th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2016*. Janov: University of Genoa, 2016. s. 25-31. ISBN 978-88-97999-68-3.
- [35] NOVOTNÝ, Radek a Antonín KAVIČKA. Unitary hybrid model of railway traffic. In *29th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2017*. Rende: CAL-TEK SRL, 2017. s. 181-186. ISBN 978-1-5108-4765-1.
- [36] DIVIŠ, Roman a Antonín KAVIČKA. Design and development of a mesoscopic simulator specialized in investigating capacities of railway nodes. In *27th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2015*. Janov: University of Genoa, 2015. ISBN 978-88-97999-48-5.
- [37] NOVOTNÝ, Radek a Antonín KAVIČKA. Different traffic submodels scalable unitary hybrid simulator related to railway systems. In *30th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2018*. Janov: University of Genoa, 2018. s. 137-142. ISBN 978-88-85741-06-5.
- [38] MONTIGEL, M. Formal representation of track topologies by double vertex graphs. In *Proceedings of Railcomp 92 held in Washington DC, Computers in Railways 3*. Technology: Computation Mechanic Publications, vol. 2, 1992.
- [39] CENEK, Petr, Valent KLIMA a Jaroslav JANÁČEK. *Optimalizace dopravních a spojových procesů*. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, 1994. ISBN 80-7100-197-X.
- [40] PARAMICS. *Paramics Microsimulation – 3D Traffic simulation*. Sias Ltd, 1990. Dostupné z: <https://www.paramics.co.uk/en/>
- [41] DYNASMART. *Dynamic Network Assignment-Simulation Model for Advanced Roadway Telematics*. 2007. Dostupné z: <https://mctrans.ce.ufl.edu/featured/dynasmart/>
- [42] MITSIMLAB. *MIT Intelligent Transportation Systems*. MIT, 1990. Dostupné z: <https://its.mit.edu/software/mitsimlab/>
- [43] AIMSUN. *Aimsun2- Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*. Polytechnic University of Catalonia, 2011. Dostupné z: <https://www.aimsun.com/about-aimsun/>

- [44] EMME. *A complete multimodal transportation planning system for urban, regional and national transportation forecasting*. Quebec, 2018. Dostupné z: <https://www.inrosoft.com/en/products/emme/>
- [45] PTV GROUP. *Visum, Vissim, Viswalk, Vistro and Vistad*. London, 2018. Dostupné z: <https://www.ptvgroup.com/en/>
- [46] SIMONE. *Simon's simulation software*. Sweden, 2005. Dostupné z: <https://www.acc.umu.se/~simsoft/download.php>
- [47] HADDON, J. *Evaluation of AHS throughput using SmartCap*. Proceedings of the 1997 American Control Conference. Albuquerque, 1997. ISBN 0-7803-3832-4.
- [48] SALVA, Ivan. *Simulácia pohybu koľajových vozidiel*. Žilina, 2005. Disertační práce. Žilinská univerzita v Žilině.
- [49] RailML. *The XML interface for railway applications*. RailML.org, 2015. Dostupné z: <http://www.railml.org/index.php/home.html>
- [50] NOVOTNÝ, Radek a Antonín KAVIČKA. Hybrid simulation model supporting efficient computations within rail traffic simulations. In *31th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2019*. Janov: University of Genoa, 2019. s. 16-22. ISBN 978-888574126-3.
- [51] SŽDC. *D1 – Dopravní a návěstní předpis*. SŽDC, 2013. Dostupné z: <https://provoz.szdc.cz/portal/Show.aspx?oid=1565121>
- [52] BENDFELDT, J-P., MOHR, a MULLER, L. RailSys, a system to plan future railway needs. *Computers in railways VII*. [online]. Boston: WIT Press, 2000. ISBN 1-85312-826-0. Dostupné z: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CR00/CR00024FU.pdf>
- [53] OPENTRACK. *OpenTrack Railway Technology*. OpenTrack Railway Technology GmbH, 2019. Dostupné z: [http://www.opentrack.cz/opentrack\\_cz.html](http://www.opentrack.cz/opentrack_cz.html)
- [54] RMCON. *RailSys 2019*. Rail Management Consultants Internation GmbH, 2019. Dostupné z: <https://www.rmcon.de/home-en/>
- [55] RailSys. *Appendix A – About RailSys 3.0*. Rail Management Consultants Internation GmbH, 2019. Dostupné z: <https://docplayer.net/18871367-Appendix-a-about-railsys-3-0-a-1-introduction.html>

- [56] INCONTROL. *Simulation and Railway Networks*. Utrecht, The Netherlands, 2018. Dostupné z: <https://www.incontrolsim.com/application-areas/railway-simulation>
- [57] Berkeley Simulation Software. *Rail Traffic Controller (RTC)*. Berkeley Simulation. Dostupné z: <http://berkeleysimulation.com/index.php>
- [58] Rail-sim. *Train Simulator Railsim*. Rail-Sim.de, 2019. Dostupné z: <https://www.rail-sim.de>
- [59] ANYLOGIC. *Rail Simulation Software*. Anylogic.com, 2019. Dostupné z: <https://www.anylogic.com/rail-logistics>
- [60] BORGDORFF, J., M. BEN BELGACEM, C. BONA-CASAS, et al. Performance of distributed multiscale simulations. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* [online]. 2014, 372(2021) [cit. 2020-07-27]. DOI: 10.1098/rsta.2013.0407. ISSN 1364-503X. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2013.0407>
- [61] ČERNÝ, J. a P. KLUVÁNEK. *Základy matematickej teórie dopravy*. Veda Bratislava 1991, 280 s. ISBN 80-224-0099-8.
- [62] KLIMA, V. a Antonín KAVIČKA. Simulačná podpora plánovania procesov v železničných uzloch. In *Dopravní systémy 2005*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2005. s. 277-288. ISBN 80-7194-805-5.
- [63] IWNICKI, S. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, c2006. ISBN 978-0-8493-3321-7.
- [64] SADLOŇ, Ľ. *Simulačný model železničnej zriaďovacej stanice*. Žilina, 1994. Disertační práce. Vysoká škola dopravy a spojov.
- [65] SKÝVA, L., JANÁČEK, J. a Petr CENEK. *Energeticky optimální řízení dopravních systémů*. Vyd. 1. Praha: NADAS, 1987. 288 s.
- [66] SŽDC. *SM124: Zjišťování kapacity dráhy*. Praha, 2019. Dostupné z: [https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/64303803/SZDC\\_SM124\\_20190611.pdf/8fd73b0d-82db-4fe7-bf14-bc7c6493169e?version=1.0](https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/64303803/SZDC_SM124_20190611.pdf/8fd73b0d-82db-4fe7-bf14-bc7c6493169e?version=1.0)

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Vizualizace infrastruktury v různých úrovních podrobnosti .....	17
Obrázek 2 - Super hrubá topologie železniční sítě .....	17
Obrázek 3 - Kombinace simulačních nástrojů .....	19
Obrázek 4 - Příklad hybridního modelu železniční infrastruktury .....	20
Obrázek 5 - Model infrastruktury v nástroji OpenTrack .....	23
Obrázek 6 - Model infrastruktury v nástroji Villon .....	24
Obrázek 7 - Model infrastruktury v nástroji RailSys .....	25
Obrázek 8 - Model infrastruktury v nástroji NEMO .....	26
Obrázek 9 - Grafická ilustrace modelu železniční infrastruktury .....	29
Obrázek 10 - Dopředná hvězda .....	30
Obrázek 11 - Vnitřní struktura vybrané reprezentace neorientovaného grafu .....	30
Obrázek 12 - Reprezentace podporovaných typů výhybek pomocí grafu .....	31
Obrázek 13 - Mikroskopický model infrastruktury v editoru TrackEd .....	32
Obrázek 14 - Grafická ilustrace prototypu celé křižovatkové výhybky v editoru TrackEd .....	33
Obrázek 15 - Množina předpočítaných vlakových cest v editoru TrackEd .....	33
Obrázek 16 - Pohled na změny sklonů v editoru TrackEd .....	34
Obrázek 17 - Výsledek automatizované kontroly v editoru TrackEd .....	35
Obrázek 18 - Šablona mikroskopického modelu infrastruktury editoru TrackEd .....	36
Obrázek 19 - Ilustrace vztahů makro-segmentů. Zdroj: vlastní .....	39
Obrázek 20 - Dvouúrovňový koncept hybridního modelu infrastruktury. Zdroj: vlastní .....	40
Obrázek 21 - Ilustrace makro-vrcholů .....	42
Obrázek 22 - Ilustrace makro-hran .....	43
Obrázek 23 - Kombinace makro-segmentů .....	44
Obrázek 24 - Hybridní model infrastruktury s makro-vrcholem incidentním s makro-hranou .....	44
Obrázek 25 - Ukázka šablony hybridního modelu infrastruktury využívaná editorem TrackEd .....	45
Obrázek 26 - Agregovaný model infrastruktury .....	46
Obrázek 27 - Ilustrace obvodu železniční stanice .....	47
Obrázek 28 - Makroskopický submodel provozu (koncept proudění kapalin) .....	49
Obrázek 29 - Makroskopický submodel provozu (koncept soupeření o sdílené zdroje) .....	51
Obrázek 30 - Vizualizace pohybu vlaku v mikroskopickém submodelu .....	53
Obrázek 31 - Maximální kapacita makro-hrany .....	59
Obrázek 32 - Maximální kapacita makro-vrcholu .....	60
Obrázek 33 - Rezervace kapacity makro-vrcholu .....	62
Obrázek 34 - Stanovení okamžiků výstupů vlaků z makro-segmentu .....	65
Obrázek 35 - Metodický postup uplatněný v rámci případové studie .....	76
Obrázek 36 - Geografický model infrastruktury v měřítku .....	77
Obrázek 37 - Mikroskopický model infrastruktury hraničních stanic v editoru TrackEd .....	78
Obrázek 38 - Mikroskopický model infrastruktury prototypové stanice v editoru TrackEd ...	79
Obrázek 39 - Prověřovaný grafikon vlakové dopravy .....	80
Obrázek 40 - Variantní konfigurace modelu infrastruktury pro odlišné scénáře .....	83
Obrázek 41 - Porovnání jízdních dob v rámci deterministické mikroskopické simulace .....	84
Obrázek 42 - Tachogram vybraného vlaku 7800 z nástroje Villon .....	85

Obrázek 43 - Tachogram vybraného vlaku 7800 z nástroje SimTrackEd .....	86
Obrázek 44 - Porovnání jízdních dob v rámci deterministických simulací (mikroskopický model vs. různé variace hybridního modelu) .....	88
Obrázek 45 - Porovnání průměrných sumárních vážených přírůstků zpoždění (meanSWDI) v rámci stochastické mikroskopické simulace v nástrojích SimTrackEd a Villon .....	91
Obrázek 46 - Ilustrace konfliktu mezi vlaky na zhlaví v železniční stanici.....	94
Obrázek 47 - Porovnání průměrných přírůstků zpoždění v rámci stochastických simulací (mikroskopický model vs. různé variace hybridního modelu).....	95

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Algebraická specifikace modelů kolejiště .....	37
Tabulka 2 - Algebraická specifikace vlastností makro-segmentů.....	38
Tabulka 3 - Matice přípustné sousednosti submodelů provozu „nad“ různými oblastmi infrastruktury .....	48
Tabulka 4 - Specifikace značení statických a dynamických atributů.....	58
Tabulka 5 - Vybrané charakteristiky vlaků .....	81
Tabulka 6 - Statický plán přidělování staničních kolejí v prototypové stanici P.....	81
Tabulka 7 - Parametry zpoždění vlaků.....	81
Tabulka 8 - Váhy jednotlivých sledovaných typů dopravy.....	84
Tabulka 9 - Porovnání sumárních jízdních dob při uplatnění různých makroskopických modelů provozu.....	87
Tabulka 10 - Dosažené jízdní doby jednotlivých vlaků pro scénáře Sc01d, Sc02d, Sc03d a Sc04d s využitím modelu sdílených zdrojů.....	89
Tabulka 11 - Porovnání dosažených hodnot indikátoru meanSWDI.....	90
Tabulka 12 - Směrová tabulka pro makro-vrchol P .....	92
Tabulka 13 - Průměrná délka vlakových cest v makro-vrcholu P .....	92
Tabulka 14 - Zábrzdné vzdálenosti pro makro-hranu .....	92
Tabulka 15 - Délka vlakových cest v makro-hranách.....	93
Tabulka 16 - Charakter provozu v rámci stochastických simulací vyjádřený indikátorem meanSWDI.....	93
Tabulka 17 - Limitní hodnoty přírůstků zpoždění pro klasifikaci kvality provozu .....	96
Tabulka 18 - Odvození kvality provozu z hodnoty přírůstků zpoždění dle směrnice SM124. 96	