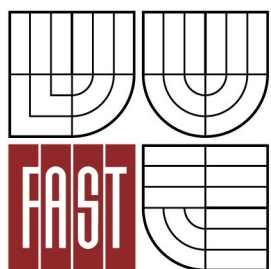




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

# OPTIMALIZACE DOPRAVNÍ SÍŤE

TRANSPORT NETWORK OPTIMIZATION

DISERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

ING. MARTIN VŠETEČKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR HOLCNER, Ph.D.

BRNO 2015



### **Abstrakt**

Práce se zabývá návrhem optimalizačního algoritmu využívajícího genetický algoritmus. Optimalizační úloha je předvedena na problematice levého odbočení, které splňuje předpoklady pro systematickou optimalizaci - komplexnost problému, který nejde řešit analyticky, a zároveň možnost použití šablon, které umožní automatizaci návrhu a výpočtu všech variant.

### **Klíčová slova**

Dopravní síť, Dopravní model, Optimalizace, Levá odbočení, Genetický algoritmus

### **Abstract**

The thesis proposes an optimization algorithm used a genetic algorithm. Optimization problem is demonstrated on issues of left turn which meets the requirements for systematic optimization – complexity of the problem, which can not be solved analytically, and the possibility of using templates, which enable automation of design and calculation of all variants.

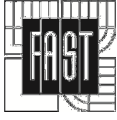
### **Keywords**

Transport Network, Transport Model, Optimization, Left Turns, Genetic Algorithm



### **Bibliografická citace VŠKP**

Ing. Martin Všeťečka *Optimalizace dopravní sítě*. Brno, 2015. 110 s., 145 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Holcner, Ph.D.

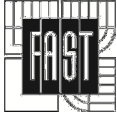


**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 6. 2015

.....  
podpis autora  
Ing. Martin Všeťčka



Děkuji svému školiteli doc. Petru Holcnerovi a dalším kolegům, kteří podnětnými postřehy přispěli ke vzniku této práce, jmenovitě Ing. Martinu Novákovi, doc. Tomáši Apeltauerovi, Ing. Jiřímu Apeltauerovi a dr. Michalu Radimskému.

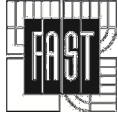


Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta stavební  
Ústav pozemních komunikací

Ing. **Martin Všečeka**  
**OPTIMALIZACE DOPRAVNÍ SÍTĚ**  
Disertační práce

---

*Via Vita.*



## OBSAH

1	<b>Úvod</b> .....	3
1.1	Motivace.....	4
1.2	Cíle práce.....	4
2	<b>Dopravní síť</b> .....	5
2.1	Mrtvá dopravní síť.....	5
2.1.1	Základní úlohy.....	7
2.1.2	Komplexnost a uspořádání mrtvé dopravní sítě.....	9
2.1.3	Hierarchizace mrtvé dopravní sítě.....	11
2.2	Živá dopravní síť.....	13
2.3	Chování uživatelů.....	15
2.4	Reálné dopravní sítě v Česku.....	15
2.4.1	Síť pozemních komunikací.....	16
2.4.2	Síť drah.....	18
3	<b>Optimální dopravní síť</b> .....	20
3.1.1	Multikriteriální hodnocení dle Metodického pokynu 11/1995.....	20
3.1.2	Finanční ohodnocení všech kritérií.....	22
3.1.3	Užitek jednotlivce versus obecný užitek.....	23
4	<b>Dopravně-inženýrské výpočty</b> .....	26
4.1	Matematické modelování dopravy.....	26
4.1.1	Věrohodnost dopravních modelů.....	27
4.1.2	Strategické modely dopravní sítě.....	29
4.1.3	Modely dopravního proudu.....	33
4.1.4	Dopravní modelování v praxi.....	36
4.2	Výpočty dle technických podmínek.....	37
4.2.1	TP 189 – stanovení intenzity dopravy.....	37
4.2.2	TP 225 – výhledové intenzity dopravy – růstové koeficienty.....	38
4.2.3	TP 188 – posouzení neřízených křižovatek.....	39
4.2.4	TP 234 – posouzení okružních křižovatek.....	40
4.2.5	Světelně řízené křižovatky (TP 235).....	40
4.2.6	Mimoúrovňové křižovatky (TP 236).....	41
4.2.7	Požadovaná úroveň kvality dopravy.....	42
4.2.8	Železniční přejezdy.....	44
4.2.9	Mezikřižovatkové úseky v extravilánu (ČSN 73 6101, příloha A).....	44
5	<b>Systematická optimalizace</b> .....	45
5.1	Pokusná versus systematická optimalizace.....	45
5.2	Heuristika.....	45
5.3	Genetický algoritmus.....	46
5.3.1	Princip optimalizace.....	46
6	<b>Hledání vhodné úlohy pro optimalizaci</b> .....	48
6.1	Křižovatky pozemních komunikací.....	48
6.1.1	Řízení silniční dopravy.....	52
6.2	Zákaz levého odbočení.....	59



6.2.1	Neřízené průsečné a stykové křižovatky .....	60
6.2.2	Okružní křižovatky .....	60
6.2.3	Světelně řízené průsečné a stykové křižovatky .....	61
6.2.4	Nekonvenční křižovatka .....	64
6.2.5	Zákaz jízdy přímo .....	65
6.2.6	Zjednosměrnění dopravní sítě .....	66
6.2.7	Mimoúrovňové křižovatky .....	66
6.2.8	Rozsah úlohy levého odbočení .....	67
<b>7</b>	<b>Navržený optimalizační algoritmus .....</b>	<b>71</b>
7.1	Vytvoření sítě .....	74
7.2	Matice dopravních vztahů .....	76
7.3	Nalezení nejrychlejší cesty – Dijkstrův algoritmus .....	77
7.4	Postupné přidělování dopravní zatížení .....	79
7.5	Křižovatky .....	79
7.5.1	Zakázaná odbočení .....	79
7.5.2	Návrh signálního plánu .....	79
7.5.3	Výpočet kapacity a doby zdržení .....	86
7.6	Hodnocení použitého modelu .....	87
7.7	Optimalizace – genetický algoritmus .....	87
7.8	Výsledek optimalizačního algoritmu .....	88
<b>8</b>	<b>Závěr a doporučení .....</b>	<b>90</b>
8.1	Postřehy z řešení úlohy .....	91
8.2	Praktické využití .....	92
	Seznam použitých zdrojů .....	93
	Předpisy .....	93
	Publikace .....	94
	Databáze a zdroje dat .....	96
	Seznam zkratk .....	97
	Slovníček pojmů .....	98
	Rejstřík .....	99
	Seznam příloh .....	100
	PŘÍLOHA A: Dijkstrův algoritmus – ukázka .....	101
	PŘÍLOHA B: Návrh šablonového signálního plánu .....	113
	PŘÍLOHA C: Zdrojový kód optimalizačního algoritmu v jazyce VBA .....	125



# 1 ÚVOD

Otevřeli jste disertační práci s názvem Optimalizace dopravní sítě. Cílem práce bylo ověřit použitelnost vhodného optimalizačního algoritmu pro nalezení takových parametrů dopravní sítě, kdy bude dosahována nejlepší kvalita dopravy.

Dopravní síť je velmi široký pojem, neboť doprava je realizována po pozemních komunikacích, dráhách, vodních cestách, v leteckých koridorech, v produktovodech či dopravnících. S ohledem na odborné zaměření ústavu, kde byla disertační práce vypracována, se práce více soustředí na síť pozemních komunikací – laicky silnic, odborně ale kromě silnic také městských a účelových komunikací a dálnic. I síť pozemních komunikací je příliš široký pojem, neboť tato nabývá mnoha různých parametrů od vlastností vozovek, přes geometrii ovlivňující bezpečnost provozu až po kapacitu a kvalitu dopravy.

Snahou tedy bylo vybrat konkrétní úlohu a najít řešení, které by mohlo být zevšeobecněno i na obdobné úlohy. Jako konkrétní úlohu byla v průběhu práce vybrána koncepce levých odbočení, která často snižují kapacitu křižovatek a jsou proto ad hoc omezována, což sice snižuje zatížení dané křižovatky, ale zvýší zátěž křižovatky jiné, snad zkrátí dobu zdržení vozidlům neodbočujícím vlevo a asi prodlouží celkovou dobu jízdy vozidlům, jejichž řidiči potřebovali odbočit vlevo a nemohou. Věc totiž nemusí být zcela jednoznačná, jak by se mohlo na první pohled zdát, což se pokusím vysvětlit dále v textu této práce.

Samotná optimalizace probíhá s využitím genetického algoritmu. Výpočet se provádí na matematickém modelu dopravní sítě, který umožňuje zatížit dopravní síť dopravní poptávkou a najít pro všechny cesty nejvýhodnější trasu při respektování zakázaných levých odbočení. Model pochopitelně umožňuje výpočet hodnoty optimalizačního kritéria, průměrné doby jízdy, na základě běžných dopravně-inženýrských zvyklostí.

Jistou zajímavostí související s použitým genetickým algoritmem je, že výchozí obor, genetika, vznikl před sto padesáti lety půldruhého kilometru od místa, kde byla zpracována tato disertační práce – v Augustiniánském opatství na Starém Brně, kde tehdy působil zakladatel genetiky Gregor Mendel<sup>1</sup>.



*Obr. 1-1. Gregor Mendel (zdroj: wikipedia)*

<sup>1</sup> 1822 Hynčice –1884 Brno; opat augustiniánského kláštera na Starém Brně [Wikipedia]



## 1.1 Motivace

Motivací k tvorbě této práce je koncepce (nejenom) českých technických předpisů v oblasti dopravního inženýrství, přesněji řečeno předpisů pro posuzování pozemních komunikací z hlediska kapacity a kvality dopravy. Tyto předpisy dávají návod pro řešení mezikřižovatkových úseků i křižovatek – je tak možno propočítávat, kolik má mít silnice pruhů a jakého má být křižovatka typu. Výsledky je možno porovnat s požadovanými hodnotami nazývanými úroveň kvality dopravy a rozhodnout tak, zda dotyčná dopravní stavba budoucímu provozu vyhoví či nevyhoví.

Tento postup má ale zásadní problém – prakticky lze řešit jen jednotlivou křižovatku. Je tedy možné spočítat, jakou úpravu křižovatka potřebuje, aby se například odstranily časté dopravní zácpy. Řidiči by pak místem měli projet s menším zdržením a místním obyvatelům by se mělo zlepšit životní prostředí, neboť se dá předpokládat, že plynule jedoucí vozidla spálí méně paliva, než vozidla popojíždějící v kongesci. To je ten optimistický pohled. Pesimista bude čekat, že zvýšení kapacity křižovatky přiláká vozidla, která stávající zácpu objížděla, a to v takové míře, dokud zvýšení dopravní zátěže kapacitu křižovatky opět nevyčerpá. Jinými slovy – vozidla vždy vyčerpají kapacitu komunikace. Realista by se zřejmě měl dívat někam mezi a měl by umět vyčíslit dopad opatření ve vztahu k celé síti.

Způsob výpočtu dopravní sítě, zohledňující zvyšování či snižování kapacity jednotlivých komunikací a křižovatek, je znám a využíván a nazývá se strategický dopravní model. S různou mírou zjednodušení lze modelovat pohyb osob, zboží a vozidel z výchozího bodu cesty (např. domov) do bodu cílového (např. zaměstnání). V modelu lze měnit kapacitu či jiné parametry zvolené křižovatky a pak sledovat, jak se změna projeví a jestli řidiči nezačnou měnit trasu svých cest.

Při hledání nejvhodnější konfigurace křižovatky, tzn. optimalizaci jejích parametrů ve vztahu k dopravní síti, nutně vyvstává otázka, zda by nebylo lepší optimalizovat rovnou celou síť. Místo úprav jedné vybrané křižovatky by se upravovaly úplně všechny křižovatky, tzn. prováděla by se optimalizace celé dopravní sítě. Je zřejmé, že s rostoucí velikostí dopravní sítě roste počet variant, které je nutno prověřit. Pokud by se u každé křižovatky prověřovalo 10 variant a v síti bylo 100 křižovatek, tak bylo nutné dopravní model propočítat  $10^{100}$  krát. Metoda pokus-omyl, která je v rozumném čase zvládnutelná u jednotlivé křižovatky, musí být při optimalizaci celé sítě nahrazena systematickým postupem.

V různých oborech lidské činnosti se optimalizace, to znamená určitý algoritmus pro hledání nejlepší (optimální) varianty, běžně používá. Výzva je tak jasná – sestavit algoritmus pro hledání nejlepšího uspořádání dopravní sítě.

## 1.2 Cíle práce

Za cíle práce byly, jak vyplývá z předchozí kapitoly a koneckonců i z názvu práce, zvoleny: **Algoritmus pro systematické hledání nejlepší konfigurace dopravní sítě (optimalizace dopravní sítě)**

Vzhledem ke zmatení jazyků, ke kterému běžně dochází včetně textů odborných, je vhodné upozornit na odlišnosti dvou pojmů:

1. Optimalizace (dopravní sítě) – proces hledání nejlepšího (tzn. optimálního) řešení.
2. Optimální (dopravní síť) – nalezené nejlepší řešení.

## 2 DOPRAVNÍ SÍŤ

Je-li názvem a tím v podstatě zadáním práce optimalizace dopravní sítě, tak je jistě na místě otázka, co to je optimální dopravní síť. Odpověď není, jak bude ukázáno níže, zcela jednoznačná a vyplyne z požadavků, které na dopravní síť poklademe. Nejdříve ale bude nutné definovat, co je myšleno termínem dopravní síť.

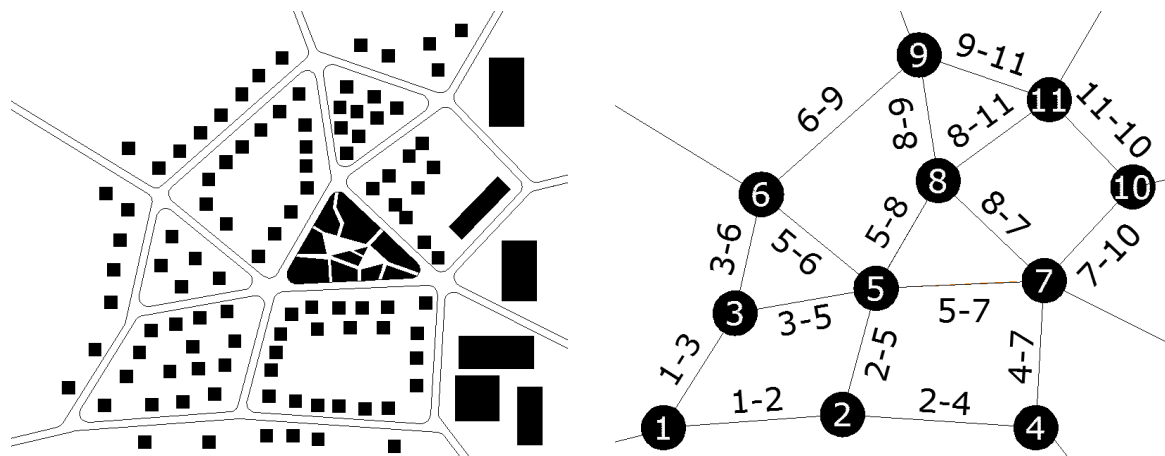
Pojem dopravní síť je běžně používán pro dva související, ale rozdílné systémy:

- komunikace a jejich křižovatky sloužící pro jízdu dopravních prostředků, případně přímo přepravovaných předmětů. Takto se dá hovořit o síti pozemních komunikací, drah, vodních a leteckých cest, produktovodů apod. Taková síť je v této práci označena jako **mrtvá dopravní síť** a je definována parametry komunikací;
- dopravní prostředky, které se systematicky pohybují po mrtvé síti a které přepravují osoby či náklad. Příkladem může být síť linek hromadné dopravy nebo síť poštovních spojů. Taková síť je v této práci označena jako **živá dopravní síť** a je definována jízdním řádem.

Mrtvé dopravní sítě je tedy určena v prostoru, kdežto živá dopravní síť je určena jak v prostoru, tak v času.

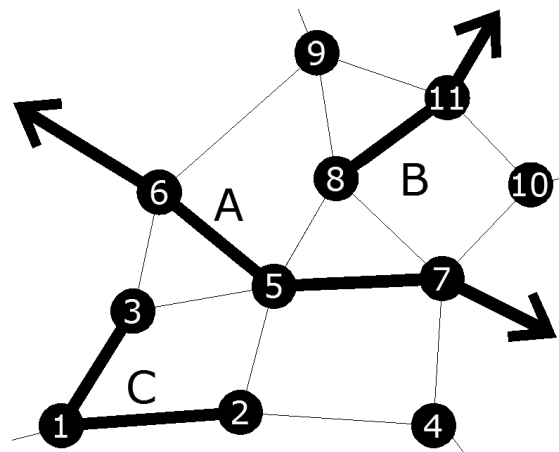
### 2.1 Mrtvá dopravní síť

Pro řešení různých úloh lze mrtvou dopravní síť reprezentovat síťovým grafem, ve kterém jsou komunikace zobrazeny jako hrany a křižovatky jako uzly.



Obr. 2-1. Vlevo síť komunikací a jejich křižovatek v městské zástavbě, vpravo jejich zobrazení síťovým grafem. Uzly jsou očíslovány, hrany jsou označeny dle uzlů, se kterými jsou incidentní – pořadí uzlů může v případě potřeby označit směr. Toto imaginární město má pouze jednu dopravní síť, a to síť pozemních komunikací – města mohou mít síť drážní, samostatné cyklostezky apod.

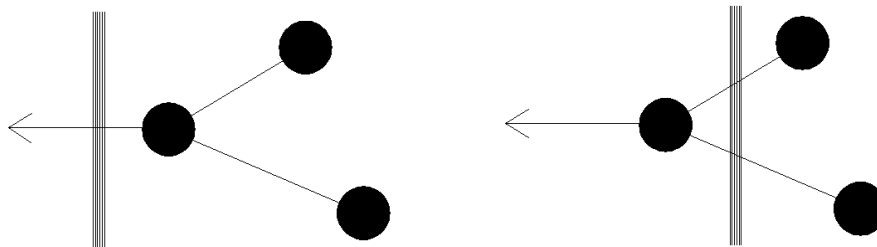
Pokud není úlohou mrtvá dopravní síť na ostrově či uzavřené vojenské základně, je nezbytné a zároveň problematické rozhodnutí o rozsahu řešené sítě. Není efektivní kvůli úpravě každé křižovatky řešit dopravní síť na celém kontinentu, naopak určení malého rozsahu sítě může potlačit významné vlivy sousedních oblastí. Každopádně je třeba určit rozsah dopravní sítě, čímž se dopravní a přepravní vztahy rozdělí na tranzitní, vnější a vnitřní. Vnější doprava se dá rozdělit na zdrojovou (z řešené sítě ven) a cílovou (zvenku do řešené sítě).



Obr. 2-2. A – tranzitní doprava; B – vnější doprava; C – vnitřní doprava.

Obecně lze říct, že podíl tranzitní dopravy klesá s velikostí města. Zatímco v malé vsi na silnici I. třídy bude většina vozidel tvořena tranzitem, ve velkých městech vysoká vnitřní a vnější doprava tranzit přechází. Například v Brně se uvádí podíl tranzitní dopravy na jednotlivých komunikacích pouhých 2 až 12 %, na dálnici D1 propojující 6 ze 7 výpadevých dálnic a silnic I. tříd měl být před zpoplatněním dálniční značkou v roce 2011 podíl tranzitu 17 % [Dokoupil, 2010].

Zpravidla je rozsah sítě dán nějakým administrativním určením, např. území města, kraje či státu. Lepší je rozsah dopravní sítě určit přirozeným spádovým územím jako je městská aglomerace, ve kterém výrazně převažuje vnitřní doprava nad dopravou vnější a tranzitní. Dále je vhodné, aby vnější a tranzitní doprava měla jednoznačné připojení do řešené sítě, viz obr. 2-3.



Obr. 2-3. Vlevo hranice v místě, kde projíždějí všechna vozidla tranzitní/vnější dopravy daného směru; vpravo hranice v místě, kde již existuje více variant, tzn. vozidla tranzitní/vnější dopravy daného směru mohou do sítě vstoupit ve více místech.

Komunikace, resp. hrany mohou nabývat různých parametrů, které popisují, zda a jak je mohou vozidla využívat. Mezi parametry hran lze zařadit:

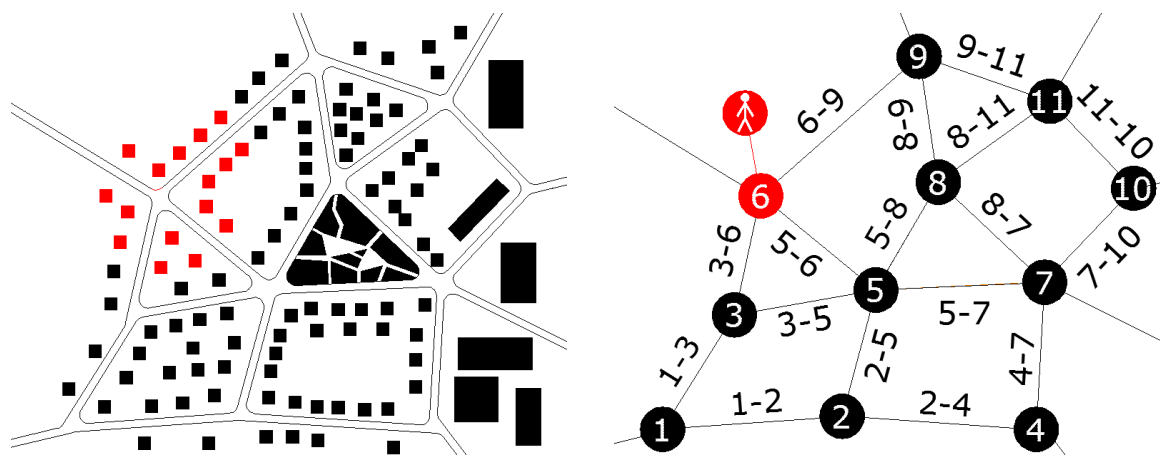
- omezení vjezdu (jednosměrné komunikace, pouze veřejná doprava apod.)
- délka
- rychlost, resp. závislost rychlosti na stupni vytížení
- kapacita

Uzly pak mohou nabývat obdobných parametrů:

- omezení odbočení
- doba zdržení v závislosti na dopravním zatížení
- kapacita jednotlivých křižovatkových pohybů

Na dopravní síť je nutno napojit zdroje a cíle dopravy. V reálné síti začínají a končí cesty plošně – parkovací stání jsou lidově řečeno na každém rohu. Při řešení úloh dopravní sítě se zpravidla využívá větší i menší, ale spíše větší agregace, tzn. neuvažuje se každé jednotlivé parkovací místo. Agregace vyplývá z velikosti řešené sítě – dopravní síť České republiky si zřejmě vystačí s agregací na města nebo okresy, pro dopravní síť města lze uvažovat se základními sídelními jednotkami<sup>2</sup>. Tyto shluky zdrojů, resp. cílů cest lze nazývat zónami, přičemž tyto zóny mají parametry vyjadřující počet cest. Zóny lze do síťového grafu připojit konektory k odpovídajícím uzlům, přičemž jedna zóna může být přiřazena více konektory k více uzlům, což může reprezentovat třeba, že v pěší dostupnosti je více zastávek veřejné dopravy různých linek. I jednotlivý konektor může být ohodnocen délkou, resp. dobou cesty.

Potíž nastává při snaze o přesné zobrazení uzlů, tj. křižovatek. Pokud je zónou např. jediný výrobní závod napojený samostatným sjezdem, tak konektor, tzn. virtuální hrana sítě, koresponduje se skutečnou křižovatkou. Pokud je ovšem zónou klasická obytná čtvrť z řadou garáží a parkovacích stání, neodpovídalo by připojení konektorem skutečné topografii sítě. existuje několik způsobů popisu, vždy je ale nutné se smířit s tím, že cílová a zdrojová doprava v blízkosti uzlu buď nebude v zatížení samotného uzlu zahrnuta, nebo bude zahrnuta velmi nepřesně.



Obr. 2-4. Vlevo skutečné rozmístění domů (garáží), vpravo idealizované (agregované) zobrazení, kdy cesty ze/do zóny jsou připojeny konektorem – virtuální hranou. Je zřejmé, že při vyčíslení intenzity křižovatkových pohybů lze zatížení přiřazené přes konektor pouze odhadovat.

### 2.1.1 Základní úlohy

Existuje řada dopravních úloh využívajících teorii grafů sloužících pro nalezení optimálního uspořádání dopravní sítě, resp. pro optimální pohyb cestujících, nákladu a náležitostí (vozidel a jízdního personálu). Pro jejich podrobnější popis odkazuji na Tuzara [1997] a v této práci zmíním pouze tři úlohy, které považuji za nejdůležitější pro představu o možnostech teorie grafů. Jsou to Úloha sedmi mostů města Královce, Úloha čínské pošťáky a Úloha obchodního cestujícího.

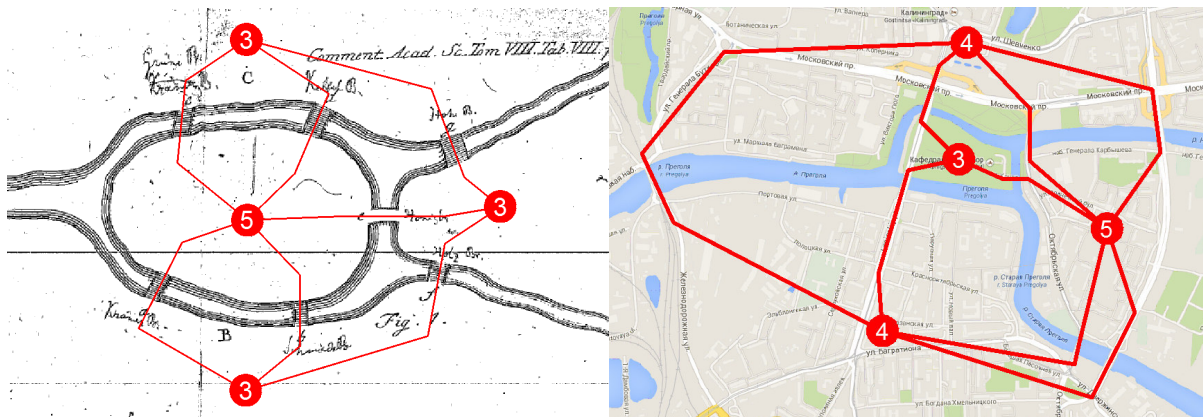
Snaha formalizovat hledání optimální cesty jako matematickou úlohu není nová - již v roce 1736 matematik a fyzik Leonhard Euler<sup>3</sup> použil metodu později nazvanou jako teorie

<sup>2</sup> Ve vybraných městech jsou určeny tak, aby měly shodné funkční využití většiny objektů. Např. Brno má 278 základních sídelních jednotek (ZSJ), což znamená průměrný počet cca 1450 obyvatel na ZSJ.

<sup>3</sup> 1707 Basilej, Švýcarsko –1783 Petrohrad, Rusko (zdroj: wikipedia).



grafů. Zadáním reálné úlohy, kterou řešil, bylo **najít trasu přes sedm mostů v Královci**<sup>4</sup>, přičemž po každém mostě bylo možné jít právě jedenkrát. Překreslením možných tras do grafu tvořeného uzly a hranami je patrná jeho myšlenka – chceme-li, abychom každou hranou prošli jen jednou, pak každému uzlu musí náležet sudý počet hran (vždy dvojice vstup do uzlu – výstup z uzlu). Nemusíme-li začínat ve stejném uzlu, ve kterém končíme, pak můžeme mít právě dva uzly s lichým počtem hran (jeden pro začátek cesty a druhý pro konec cesty). V Královci tedy tehdy nebylo možno projít všechny mosty právě jednou, neboť se tam nacházely čtyři „liché“ uzly, viz obr. 2-5.



Obr. 2-5. Královec. Vlevo dopravní síť v době Eulera; v uzlech je vyznačen počet incidentních hran – kvůli lichému počtu nešlo procestovat všechny mosty (hrany) právě jednou (podklad Euler [1736]). Vpravo stávající stav, kdy již lze procestovat všechny mosty právě jednou, pokud ovšem začneme na ostrově uprostřed a skončíme na východním ostrově nebo naopak (podklad google.cz).

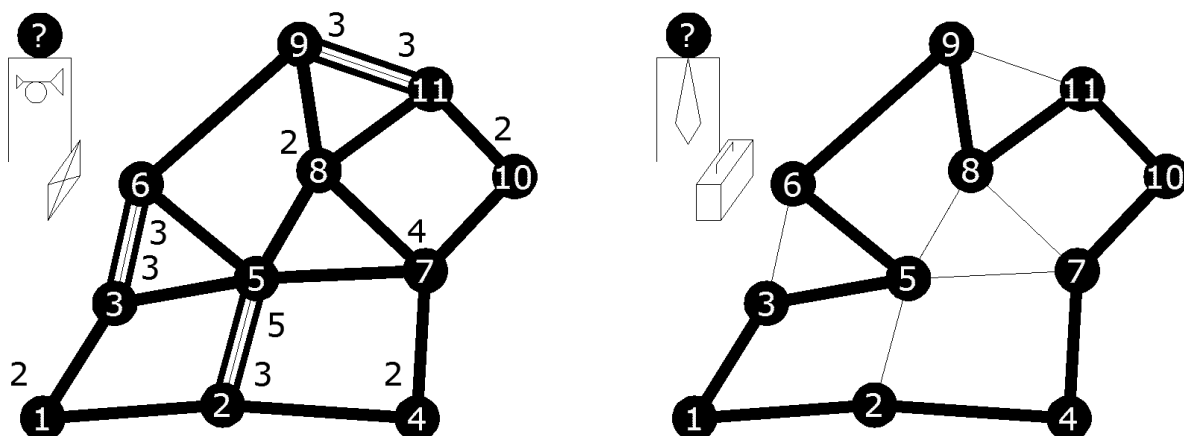
**Čínský pošťák** musí obejít všechny hrany síťového grafu (všechny ulice svého okrsku). Požaduje se, aby se pošťák vrátil do stejného místa (pošty) a zároveň, aby jeho cesta byla nejkratší. Pokud uzly splňují podmínku definovanou již Eulerem, a to sudého počtu incidentních hran v jednom uzlu, tak vždy projdeme všechny hrany a tudíž ujitá vzdálenost bude stejná. Pokud uzly výše uvedenou Eulerovu podmínku nespĺňují, tak do síťového grafu přidáme imaginární hrany spojující „liché“ uzly znázorňující, že daný úsek musíme projít dvakrát. Nejkratší cesta je pak ta, při které součet délek imaginárních hran je nejkratší. Úlohu definoval Kwan v roce 1962.

**Obchodní cestující** musí obejít všechny uzly síťového grafu (všechna města daného regionu). Řešení této úlohy je velmi problematické i při využití počítačů, neboť zatím nebyl nalezen algoritmus zajišťující nalezení skutečně nejkratší trasy. Pro řešení se používají heuristické algoritmy, tzn. takové, při kterých není známo, o kolik je nejkratší nalezená cesta delší než cesta skutečně nejkratší. Úlohu matematicky popsali v 19. století William Rowan Hamilton<sup>5</sup> a Thomas Kirkman<sup>6</sup>.

<sup>4</sup> Nyní exoteriální součást Ruska, dříve Německa, resp. Pruska. Známý též jako Kaliningrad (rusky), Königsberg (německy) a Regiomontium (latinsky).

<sup>5</sup> 1805 Dublin, Irsko – 1865 tamtéž (zdroj: wikipedie)

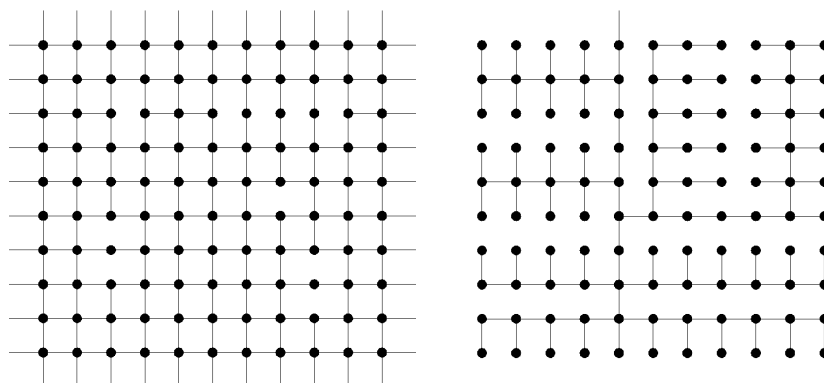
<sup>6</sup> 1806 Bolton, Anglie – 1895 Bowdon, Anglie (zdroj: wikipedie)



Obr. 2-6. Vlevo úloha čínského pošťáka, který musí projít všechny hrany (cíle – schránky jsou po délce hran), vzhledem k lichým počtům hran incidentních s uzly (viz popis u uzlů) musí některé hrany projít dvakrát. Vpravo úloha obchodního cestujícího, který musí obejít všechny uzly (cíl - klienti jsou v jednotlivých uzlech). Oba se musejí vrátit zpět do výchozího místa.

### 2.1.2 Komplexnost a uspořádání mrtvé dopravní sítě

Osamocené studium a úprava jednotlivých prvků sítě, hran a uzlů, bez zohlednění chování celé sítě, je nemožné, resp. nesprávné, protože poptávka po dopravě je flexibilní, jak co do počtu jízd, tak do trasy jízd. Hovoříme-li totiž o síti, měli bychom předpokládat vysoký počet různých tras mezi dvěma body zajištěný vzájemným propojováním uzlů dopravní sítě. V případě výstavby slepých komunikací, což je urbanismus používaný v mnoha developer-ských projektech, se o síti nedá hovořit, protože komunikace netvoří síť, svoji topologií připomínají spíše strom a jeho větve, resp. kořeny. Trasa je v tomto případě determinována, řidiči nemohou hledat alternativní trasy a celá tato práce pozbývá smysl. Pro účely této práce se síť, která bude pro vnitřní dopravu funkční i po výpadku kteréhokoli uzlu, definuje jako **pravá síť**. Naopak síť, kde výpadek kteréhokoli uzlu způsobí nefunkčnost sítě a nemožnost cesty odkudkoli kamkoli, bude nazývána jako **nepravá síť**.



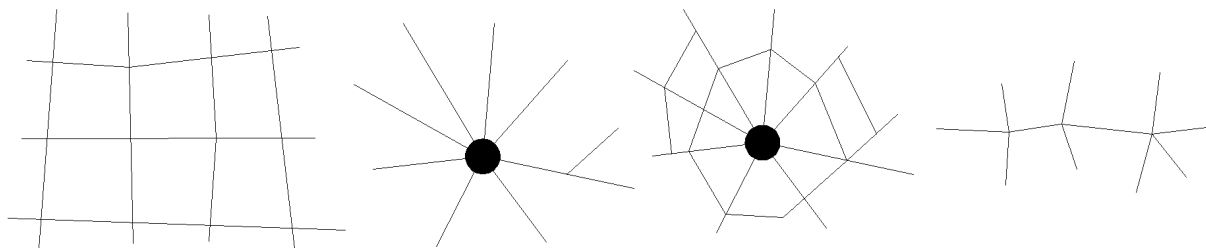
Obr. 2-7. Vlevo pravá dopravní síť, vpravo nepravá dopravní síť.

V případě pravé dopravní sítě lze pro libovolný dvojici výchozího a cílového uzlu najít více než jednu trasu. Uživatel si tak může trasu vybírat podle nejrůznějších kritérií. To zároveň znamená, že změna na jednom z prvků sítě ovlivní stav jiných prvků, které mohou být i velmi vzdálené. Příkladem nechť je zákaz jednoho odbočení. Řidiči budou nuceni jet jinou trasou.

Tím zvýší zatížení této jiné trasy, na které se zvýší doba zdržení, čímž se sníží její atraktivita a část z její dosavadní zátěže se přesune jinam. Tento cyklus se opakuje do ustáleného stavu, který může znamenat jiné, neočekávané zatížení různých prvků sítě. Výhoda dopravní sítě spočívající v široké nabídce tras umožňující objet neprůjezdné nebo obtížně průjezdné úseky znamená mnoho nejistot pro toho, kdo chce provoz na dopravní síť studovat nebo dokonce prognózovat.

První otázkou je, zda reálné chování uživatelů vede k rovnováze v rozložení dopravní zátěže a její přidělení na dopravní síť a druhá otázka je, zda reálné chování odpovídá stavu, který je na daném uspořádání sítě popisován jako nejlepší, tzn. optimální. Například běžně používané modely dopravní sítě uvažují s rovnováhou, která v síti nastane a při které je dosaženo optimálního rozdělení dopravní zátěže, tzn. kdy všichni jezdí nejlepší trasou. Přitom řidiči nejedí vždy nejlepší trasou, resp. přesněji řečeno, nejedí trasou, která je pro ně dopravními inženýry považována za nejlepší (viz kap. 4.1.2.2). To souvisí obecně s otázkou požadavků na dopravní síť, které jsou rozepsány v kapitole "optimální síť". Druhou otázkou je, zda uživatelé nejlepší trasu vůbec znají – obecně lze s kvalitativním i kvantitativním rozvojem nejrůznějších aplikací dopravní telematiky, ať už se jedná o navigace znající aktuální dopravní situaci až po proměnné dopravní značení, předpokládat, že znalost uživatelů dopravní sítě o optimální trase v blízké budoucnosti poroste.

Historicky se vyvinulo několik základní uspořádání mrtvé dopravní sítě. Prvním je **radiální**, kdy se cesty sbíhají k výraznému cíli, jako je např. střed historického města, brod apod. V moderní době, kdy vlivem dopravní zátěže dochází k přetížení centrální oblasti radiální sítě, bývá radiální síť přestavována na **radiálně-okružní**, kdy část zátěže přebírají tangenciálně vedené komunikace tvořící v cílové etapě okruh, resp. více okruhů. Druhým uspořádáním je **roštové**, které nemá centrální uzel – všechny uzly jsou v zásadě rovnocenné stejně jako jsou rovnocenné všechny komunikace. V době prvotních úvah o budování dálnic, tzn. v průběhu první republiky, existovaly návrhy na uspořádání československé dálniční sítě ve tvaru **rybí kostry** – hlavní dálnice by tvořila páteř napříč protáhlým Československem a území by bylo připojeno kolmými přívaděči.



Obr. 2-8. Dopravní síť zleva roštová, radiální, radiálně-okružní a "rybí kostra".

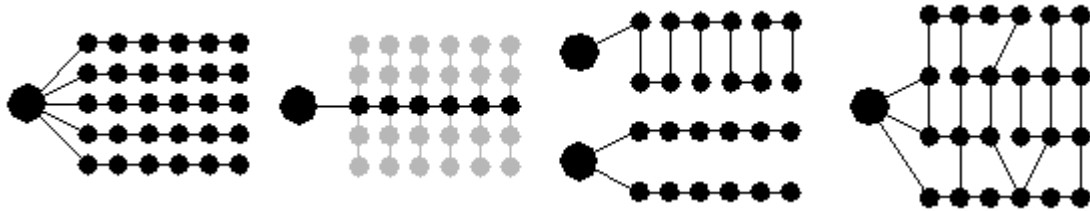
Z obr. 2-8 je zjevné, že roštová a radiálně-okružní síť se dá považovat za pravou, kdežto radiální síť a "rybí kostra" jsou sítě nepravé.

Pro popis mrtvé dopravní sítě za účely studia vhodného trasování linek hromadné dopravy definoval Vančura (2008) následující uspořádání: furcilátní, frondentní, liniové, ve směrovém svazku a planiové<sup>7</sup>.

Z Vančurou definovaných sítí je pouze planiová síť pravou, ostatní jsou nepravé.

<sup>7</sup> Názvy vycházejí z latinských názvů pro vidle – furca, (velký tropický) list – frond, rovina – plani.





Obr. 2-9. Dopravní obslužnost dle Vančury (2008): Zleva furcilátní, frondentní, liniová (dole), ve směrovém svazku (nahore) a planiová.

### 2.1.3 Hierarchizace mrtvé dopravní sítě

Ne všechny komunikace jedné a téže dopravní sítě jsou stejně důležité. Význam komunikace můžeme rozlišit dle hledisek:

- formálních – dle kategorie pozemní komunikace, dráhy apod. Každá pozemní komunikace je zařazena do některé z kategorií (viz dále), přičemž ale toto zařazení nemusí být pro uživatele rozhodující, nebo dokonce zřetelné;
- omezení přístupu – některé z komunikací mohou mít omezený přístup například dle druhu vozidla (nákladní), hmotnosti vozidla či ekologických aspektů; někteří z uživatelů tak danou komunikaci nemohou využít, přičemž obdobné omezení může platit i pro pohyb v uzlech (zákazy odbočení apod.);
- atraktivitu – o významu komunikace dobře svědčí její používání uživateli, zvláště není-li na síti zavedeno omezení dle předchozí odrážky.

Využití pozemních komunikací v Česku je patrné z tab. 2-10. Nejzatíženější profil silnice III. třídy je více než třikrát zatíženější než nejméně zatížený profil dálnice<sup>8</sup>. Z box plotu (obr. 2-11) je ale zřejmé, že většina měřených profilů dálnic je zatíženějších než silnice I. třídy, a ty jsou zatíženější než silnici II. a III. třídy, mezi nimiž není velký rozdíl.

	min	25% kvantil	medián	75% kvantil	max
Dálnice	5 875	13 881	27 670	37 292	88 460
I. třída (včetně R)	336	5 053	8 501	13 025	66 975
II. třída	56	1 121	2 362	4 557	33 347
III. třída	17	594	1 308	2 967	19 326

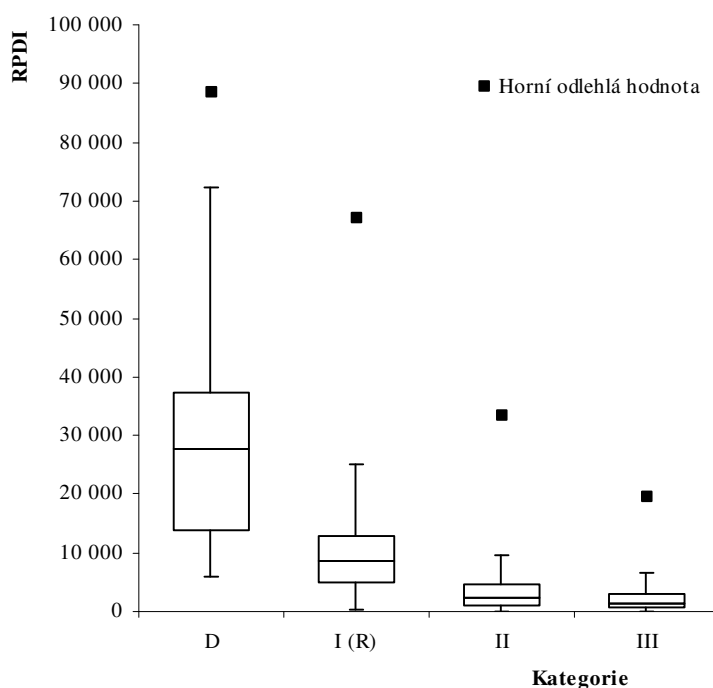
Tab. 2-10. Roční průměr denních intenzit (RPDI) dle Celostátního sčítání dopravy (CSD) 2010 rozdělený podle kategorií pozemních komunikací.

Všechna tři uvedená hlediska, která mohou popisovat hierarchii sítě, mají svůj smysl. Komunikace určené pro dálkovou dopravu bývají formálně zařazeny vysoko. To pak může mít svůj konkrétní dopad v požadovaných parametrech komunikace, která musí umožnit rychlou a plynulou jízdu. Je-li pak řešena úloha nad dopravní sítí velkého územního rozsahu (např. stát), může být pro zjednodušení úlohy přistoupeno pouze k uvažování komunikací (nej)vyššího formálního významu, u kterých se dá předpokládat, že převedou téměř všechnu z hlediska řešeného území (tedy např. státu) rozhodující dopravní zátěž.

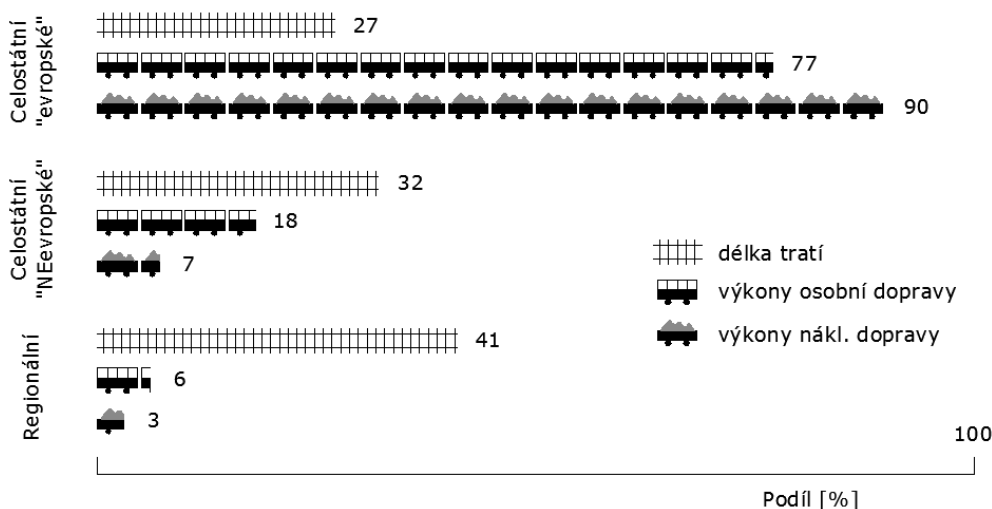
<sup>8</sup> Jedná se o III/49018 ve Zlíně s RPDI 19 326 a D1 Vrbice – Bohumín s RPDI 5 875. Nejvíce zatíženým profilem je D1 Praha-Spořilov – Praha-Chodov s RPDI 88 460 voz. a nejméně zatíženým III/19837 u Píšťova (okres Tachov) s RPDI 17 vozidel.

Omezení přístupu, např. omezení hmotnosti vozidla, musí být pro řešení úlohy nad dopravní sítí zohledněno, protože jinak by výsledek úlohy postrádal reálný smysl. Vliv omezení je pochopitelně dán jeho rozsahem, tzn. podílem uživatelů sítě, kteří jsou omezením dotčeni.

Rozlišení komunikací dle jejich atraktivity, tzn. dle počtu uživatelů, kteří se po komunikaci pohybují, může být velmi užitečné jako zpětná vazba opatření, která jsou na dopravní síti prováděna. Pokud je dle plánu určena některá komunikace jako formálně významná, ale ve skutečnosti je zatíženější jiná alternativní komunikace, tak něco není v pořádku. Řešení takového stavu je více, od změny formálního významu komunikací dle skutečného zatížení po zkvalitnění formálně důležité, ale nevytížené komunikace, po restrikce na komunikaci formálně nedůležitou, ale atraktivní. Ne vždy ale musí být rozpor mezi formální významností komunikace a její atraktivitou nežádoucím – může být výhodné, aby silná lokální doprava využila lokální komunikace a neblokovala komunikace dálkové, tzn. formálně důležitější, na které se kvůli dlouhým cestám vyžaduje vysoká kvalita jízdy.



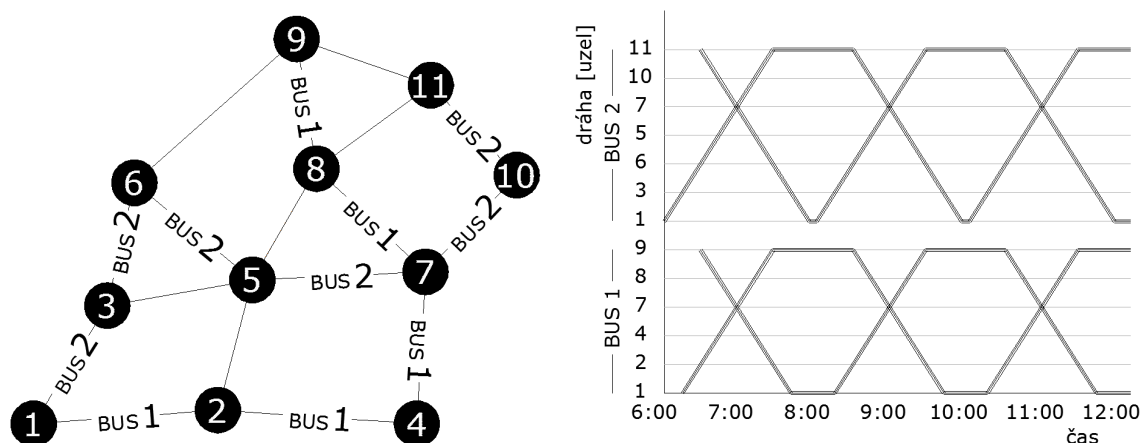
*Obr. 2-11. Box plot RPD dle CSD 2010. Obdélníky značí 25 % výskytů na obě strany od mediánu, úsečky na obě strany od obdélníků 1,5 násobek rozdílu 1. a 3. kvartilu nebo nejmenší, resp. největší naměřenou hodnotu (též odlehlou hodnotu). Patrné je, že v pásmu 50 % nejčastěji se vyskytujícího zatížení je dodržena kategorizace dle zatížení.*



Obr. 2-12. 77 % výkonů v osobní a 90 % v nákladní dopravě se realizuje na přibližně čtvrtině železniční sítě – na celostátních tratích zařazených do evropského systému. Data převzata z [Pohl 2015].

## 2.2 Živá dopravní síť

Uživatel mrtvé dopravní sítě hledá trasu, kudy pojede (půjde, poletí, popluje) a samotný přesun si zajišťuje sám. Naopak uživatel živé dopravní sítě si hledá spojení a přesunuje se dopravními prostředky, které jsou provozovány v rámci dopravní sítě. Uživatele tedy nutně zajímá jízdní řád, tzn. pohyb vozidel v prostoru a v čase.



Obr. 2-13. Vlevo dvě trasy autobusových linek 1 a 2 vyznačené na mrtvé dopravní síti, vpravo nákrešný jízdní řád (grafikon), podle kterého se dá určit kdy, odkud a kam se dá sítí autobusových linek dostat, včetně možnosti všesměrného přestupu v zastávce (uzlu) číslo 7.

Nejvýraznějším příkladem živé dopravní sítě je hromadná doprava, která zajišťuje přepravu osob dle jízdního řádu. V dnešní době se často používá termín veřejná, a to ať už jako doplněk či substitut pojmu hromadná. Hromadná doprava může být neveřejná (zájezdy, svoz

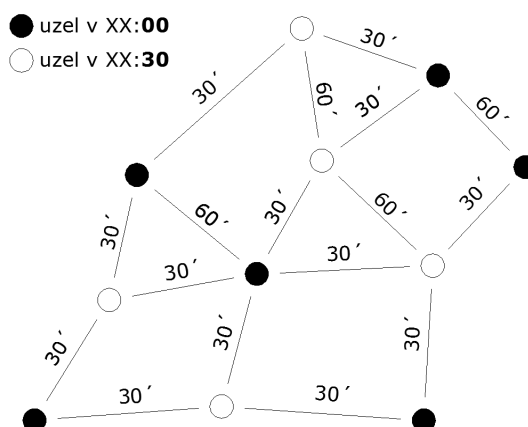
zaměstnanců) a veřejná doprava nemusí být hromadná (taxi, bike-sharing<sup>9</sup> apod.). Rovněž se používá pojmu dopravní obslužnost<sup>10</sup>, což je zabezpečení dopravy obcemi, kraji a státem.

Obecně existují dvě koncepce jízdního řádu:

- **poptávkový jízdní řád** – jízdní řád je dělán s cílem co nejlépe vyhovět známé dopravní poptávce, tzn. známým trasám cestujících ve známý čas; příkladem jsou účelové spoje k začátkům směn velkých podniků;
- **nabídkový jízdní řád** – jízdní řád je dělán bez znalosti konkrétních tras a časů, např. z důvodu, že cestující jezdí každý den v jiný čas a jinam; příkladem je intervalová nebo taktová doprava.

SOBOTA + NEDELE										PRACOVNÍ DNY							
201	203	205	207	209	211	213	215	217	219	51	9	53	3	5	7	11	
⊕†	⊕†	⊕†	⊕†	⊕†	⊕†	⊕†	⊕†	⊕†	⊕†	⊗23	⊗50	⊗150	⊗50	⊗50	⊗50	⊗50	
6:17	7:17	9:17	11:17	13:17	15:17	17:17	19:17	21:17	23:01			7:12					
6:19	7:19	9:19	11:19	13:19	15:19	17:19	19:19	21:19	23:03	6:20		7:17					
6:20	7:20	9:20	11:20	13:20	15:20	17:20	19:20	21:20	23:03	6:21		7:18					
6:21	7:21	9:21	11:21	13:21	15:21	17:21	19:21	21:21	23:04	6:23		}					
6:24	7:24	9:24	11:24	13:24	15:24	17:24	19:24	21:24	23:07	6:24		}					
6:25	7:25	9:25	11:25	13:25	15:25	17:25	19:25	21:25	23:08			7:21					
6:28	7:28	9:28	11:28	13:28	15:28	17:28	19:28	21:28	23:11			7:22					
												7:23		13:22		14:22	
6:30	7:30	9:30	11:30	13:30	15:30	17:30	19:30	21:30	23:13			7:24		13:23		14:23	
6:32	7:32	9:32	11:32	13:32	15:32	17:32	19:32	21:32	23:15			7:25		13:24		14:24	
6:33	7:33	9:33	11:33	13:33	15:33	17:33	19:33	21:33	23:16			7:28		13:27		14:27	
6:35	7:35	9:35	11:35	13:35	15:35	17:35	19:35	21:35	23:18			}	12:58	}		}	
6:36	7:36	9:36	11:36	13:36	15:36	17:36	19:36	21:36	23:19			7:29	7:30	13:00	13:29	14:00	14:29
6:37	7:37	9:37	11:37	13:37	15:37	17:37	19:37	21:37	23:20			7:34	7:35	13:05		14:05	

Obr. 2-14. Ukázka z jízdního řádu, vlevo nabídková doprava (linka 509 IDS JMK) s pravidelným vedením spojů, vpravo poptávková doprava (linka 511 IDS JMK).



Obr. 2-15. Taktová doprava – spoje se systematicky potkávají v uzlech, a to vždy v celou hodinu, resp. její násobky. Taktová doprava vyžaduje tzv. systémovou jízdní dobu 60 minut, resp. její násobek, jak je naznačeno u jednotlivých hran. Jízdní doba v tomto případě zahrnuje i dobu stání v přestupním uzlu (výstup, nástup a přestup cestujících apod.).

<sup>9</sup> Bike-sharing je systém sdílení jízdních kol, ve skutečnosti spíše půjčování. Po území (např. centrální části města) jsou rozmístěny stanice, ve kterých lze kolo vypůjčit a poté vrátit. Uživatel zpravidla může jízdní kolo vrátit jinde, než si ho vypůjčil – takto lze realizovat část nebo celou cestu. Tarif zpravidla motivuje k rychlému vrácení jízdního kola tak, aby jej uživatel neuložil např. v práci nebo v bytě, ale aby bylo k dispozici dalšímu uživateli. Podrobněji např. Hromádka [2014].

<sup>10</sup> Zákon č. 194/2010, § 2

Živá dopravní síť existuje i v nákladní branži – typickým představitelem je pošta, která v pravidelném režimu převáží zásilky po celém území státu, nebo pravidelné nákladní vlaky rozvázející vozové zásilky.

## 2.3 Chování uživatelů

Počet cest není neměnný, ale může se v závislosti na propustnosti sítě měnit. Některé cesty člověk uskuteční, jen je-li k dispozici rychlá (krátká, levná, pohodlná) trasa. Převážně bud' nerealizuje vůbec (na výlet nejede vůbec), nebo jede jinam (nakoupí v dražším, ale bližším obchodě), nebo jede jiným druhem dopravy. Jev, kdy zlepšení dopravní nabídky vede ke zvýšení dopravní (přepravní) poptávky a následně ke zvýšení dopravních (přepravních) výkonů, se běžně nazývá **dopravní indukce**. Interpretace tohoto jevu není jednoznačná. Někdo ji může považovat za negativní, neboť zvýšení dopravních výkonů vede ke zvýšení zátěže životního prostředí. Někdo jiný ji naopak může považovat za přínosnou, neboť zvyšuje kvalitu života obyvatel, kteří se za stejný čas mohou dostat k širšímu spektru služeb, mohou častěji navštěvovat blízké apod. Politický pohled na tento rozpor nabízí bílá kniha o dopravě Evropského společenství, která v odst. 18 říká: "**Omezení mobility není řešením.**" Navíc je v diskuzi o dopravní indukci nutné rozlišit, zda změřený přírůstek dopravy není vyrovnán poklesem dopravy na jiných, paralelních komunikacích, tedy zda jde o skutečně novou zátěž, nebo zda jde o stávající zátěž pouze vedenou jinudy.

Příkladem dopadu dopravní stavby na chování sítě jako celku, který nebyl všeobecně očekáván, je výstavba jižní části Pražského okruhu<sup>11</sup>. Tato komunikace má odlehčovat Prahu odvedením tranzitní, resp. vnější dopravy z vnitřní části města, zejména z Městského okruhu, v tomto úseku zejména Jižní spojce. Po zprovoznění stavby na podzim 2010 však počet vozidel na Jižní spojce naopak vzrostl ze 100 tis. na 120 tis. vozidel/den/oba směry. Přitom se změnila skladba dopravního proudu – došlo k poklesu provozu nákladních souprav. Právě vymístění tranzitní nákladní dopravy uvolnilo kapacitu pro osobní automobily. Zda se jedná o přerozdělení tras, nebo o novou zátěž, není z měření rozpoznatelné [Adámek, 2011]. Jižní spojkou zároveň využil Dopravní podnik pro zavedení zcela nové tangenciální expresní autobusové linky [Braunová, 2010].

## 2.4 Reálné dopravní síť v Česku

Zásadní význam má síť pozemních komunikací, která slouží jak motorové, tak nemotorové dopravě. Téměř veškeré přepravní nároky v osobní dopravě tak musí využít pozemní komunikace, byť jen pro chůzi k nejbližší zastávce dráhy. Síť pozemních komunikací realizuje v Česku dle dat ŘSD 80 % výkonů osobní a 77 % výkonů nákladní přepravy. V nákladní dopravě má význam i železnice, která vykazuje 22 % přepravních výkonů – letecká i říční doprava nedosahuje ani na 1 % přepravních výkonů. V osobní dopravě je významná železniční doprava s 7,3 % a letecká s 10,6 % přepravních výkonů (vše viz tab. 2-16 a 2-17).

Vysoký podíl silniční dopravy dokládají i výsledky Sčítání lidí, domů a bytů v roce 2011. Sčítání byla povinná se zúčastnit každá osoba, každá domácnost a každý majitel, resp. správce domu. Jedna z otázek byla směřována na adresu zaměstnání (školy), použitý dopravní prostředek, doba trvání dojížděky a frekvence dojížděky. Formulář neumožňoval zadat více adres dojížděky stejně jako různé dopravní prostředky v různé dny.

<sup>11</sup> Znám též jako Silniční okruh kolem Prahy (SOKP), označen jako R1

Přepravní výkon [mld. oskm]	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
CELKEM	86,46	87,78	88,47	90,44	91,51	93,67	96,3	98,45	99,16	99,63	91,41	93,07	91,15
Hromadná CELKEM	22,52	24,31	23,18	23,08	23,94	25,03	26,67	26,91	26,78	27,34	27,84	27,58	26,89
Železniční	7,3	7,3	6,6	6,52	6,59	6,67	6,92	6,9	6,8	6,5	6,59	6,71	7,26
Autobusová	9,35	10,61	9,67	9,45	8,52	8,61	9,5	9,52	9,22	9,49	10,34	9,27	9,02
Vodní vnitrozemská	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Letecká	5,86	6,4	6,89	7,1	8,81	9,74	10,23	10,48	10,75	11,33	10,9	11,59	10,61
Individ. automobilová*	63,94	63,47	65,29	67,36	67,57	68,64	69,63	71,54	72,38	72,29	63,57	65,49	64,26
Silniční CELKEM	73,29	74,08	74,96	76,81	76,09	77,25	79,13	81,06	81,6	81,78	73,91	74,76	73,28

\* odborný odhad

Tab. 2-16. Přepravní výkony osobní dopravy v České republice v letech 2000 až 2012 dle přepravního módu, zdroj dat: ŘSD (2013).

Přepravní výkon [mld. tkm]	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Celkem	57,34	57,88	61,49	62,98	61,56	59,14	67,01	65,38	67,21	58,42	66,3	69,86	66,17
Železniční	17,5	16,88	15,81	15,86	15,09	14,87	15,78	16,3	15,44	12,79	13,77	14,32	14,27
Silniční	39,04	40,26	45,06	46,56	46,01	43,45	50,37	48,14	50,88	44,95	51,83	54,83	51,23
Vodní vnitrozemská	0,77	0,7	0,59	0,51	0,41	0,78	0,82	0,9	0,86	0,64	0,68	0,7	0,67
Letecká	0,04	0,03	0,03	0,042	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01

Tab. 2-17. Podíly jednotlivých dopravních módu na přepravních výkonech nákladní dopravy v České republice v letech 2000 až 2012, zdroj dat ŘSD (2013).

dojíždka mezi obcemi	automobil				veřejná doprava				nemotorová	
	řidič	spolucestující	P&R	autobus	železnice	MHD	kombinace	kolo	pěší	
Česká rep.	41%	9%	1%	21%	7%	7%	10%	2%	2%	
Praha	32%	5%	2%	9%	7%	20%	21%	0%	2%	
Jižní Morava	33%	7%	0%	21%	7%	10%	16%	1%	3%	
Blansko	36%	8%	0%	42%	5%	1%	5%	1%	2%	
Brno-město	26%	5%	1%	11%	10%	18%	26%	0%	4%	
Brno-venkov	46%	9%	0%	24%	4%	6%	7%	2%	2%	
Břeclav	42%	9%	0%	31%	7%	1%	6%	2%	1%	
Hodonín	37%	9%	0%	36%	8%	0%	6%	3%	1%	
Vyškov	43%	10%	0%	35%	3%	1%	4%	2%	1%	
Znojmo	42%	11%	0%	30%	2%	4%	4%	2%	3%	

Tab. 2-18. Dělna přepravní práce v Česku, v Praze a v jednotlivých okresech Jižní Moravy. Zdroj: ČSÚ, SLBD 2011

## 2.4.1 Síť pozemních komunikací

V běžné mluvě často nahrazována termín silniční síť (obdobně silniční doprava), což ale není zcela korektní, neboť silnice je pouze jedním z typů pozemní komunikace. V Česku definuje Zákon o pozemních komunikacích kategorie pozemních komunikací uvedené v tab. 2-19. Obdobně dělení používají i jiné státy. Pro kratší zápis nechť je dále označení silniční síť chápáno jako síť pozemních komunikací, obdobně silniční provoz jako provoz na pozemních komunikacích apod.



Komunikace	Vlastník <sup>12</sup>	Silniční správní úřad <sup>13</sup>	Délka <sup>14</sup> [km]	Dopravní výkon <sup>15</sup> [1000 vzkm/24 hod]
Dálnice	Stát	Ministerstvo dopravy	751	21 112
Rychlostní silnice <sup>16</sup>	Stát	Ministerstvo dopravy	442	53 388
Silnice I. třídy	Stát	Krajský úřad	5 807	
Silnice II. třídy	Kraj	Úřad obce s rozšířenou působností	14 542	33 930
Silnice III. třídy	Kraj	Úřad obce s rozšířenou působností	34 172	20 460
Místní komunikace	Obec	Obecní úřad		
Účelová komun.	kdokoli	Obecní úřad		

Tab. 2-19. Kategorie pozemních komunikací v Česku včetně jejich délky a dopravních výkonů – povšimněte si délky dálnic a silnic III. tříd a jejich výkonů.

Sk.	Funkce	Popis
A	dopravní	Městské rychlostní komunikace, jako jsou městské okruhy a přivaděče. Slouží výhradně motorové dopravě, předpokládají se mimoúrovňové křižovatky a mimoúrovňová křížení stejně jako nadchody či podchody.
B	dopravní + obslužná	Hlavní městské komunikace sloužící motorové i nemotorové dopravě; dopravě průjezdné i obslužné. Křižovatky jsou úrovňové. Lze použít označení třída, bulvár apod.
C	obslužná	Méně významné komunikace sloužící pro lokální obsluhu, neměly by sloužit průjezdné dopravě.
D1	s omezenou dopravou	Pěší a obytné zóny, do kterých je omezen (zakázán) vjezd vozidel, příp. i cyklistů. Chodci se mohou pohybovat po celé šířce komunikace, tzn. nepředpokládá se výrazné odlišení chodníků a jízdního pásu.
D2	bez motorové dopravy	Stezky pro chodce a/nebo cyklisty, motorová doprava vyloučena.

Tab. 2-20. Funkční skupiny komunikací v intravilánu.

Toto dělení má vliv na legislativní a administrativní stránku věci (kdo co schvaluje a kdo co platí), ale má i technický rozměr v určení významu v celkové dopravní síti. U vyšší kategorie komunikace se předpokládá její použití pro delší trasu (mezistátní, přes celý stát apod.),

<sup>12</sup> §9 odst. 14 Zákona č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích

<sup>13</sup> §40 Zákona č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích

<sup>14</sup> V roce 2013 dle ŘSD (2013)

<sup>15</sup> V roce 2012 dle ŘSD (2013)

<sup>16</sup> Dle Zákona č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích patří rychlostní silnice mezi silnice I. třídy, vzhledem k velké odlišnosti se ale běžně vyčleňují do samostatné kategorie. Ministerstvo dopravy plánuje kategorii rychlostních silnic zcela zrušit a stávající rychlostní silnice rozdělit mezi dálnice a silnice I. třídy (Skovajsa, 2013). Dle Zákona č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích existuje „silnice pro motorová vozidla“ – takto jsou v praxi označovány rychlostní silnice, ale mohou takto být označené i silnice I. třídy nezařazené mezi rychlostní silnice, např. I/23, I/43 a I/50 v Brně.

tzn. řidič ji využívá delší dobu. Naopak komunikace nižších kategorií by měly sloužit pro krátké cesty v rámci obce či regionu, což má vliv mj. na požadovanou úroveň kvality dopravy.

Především v intravilánu, kde mají komunikace kromě jízdy motorových vozidel i další funkce, jako je provoz nemotorové dopravy, provoz veřejné hromadné dopravy, parkování vozidel či prostý pobyt obyvatel, se komunikace dle ČSN 73 6110 dělí na funkční skupiny uvedené v tab. 2-20.

## 2.4.2 Síť drah

Zákon o drahách 266/1994 Sb. zná následující dráhy uvedené v tabulce 2-21.

Dráha	Kategorie	Popis
železniční	celostátní	v Česku celkem 9 468 km, z toho 1 927 km (20 %) vícekolejných, 3 217 km (40 %) elektrizovaných a 375 km (4 %) s traťovou rychlostí 160 km/h <sup>17</sup>
	regionální	
	(místní <sup>18</sup> )	
	vlečková	v Česku 2 097 vleček o celkové délce 6 266 km <sup>19</sup>
	speciální	síť železniční dráhy speciální, tzn. metra, je v Česku provozována pouze v Praze, provozní délka tří tras je celkem 59,4 km, v roce 2015 bude provozována síť prodloužena o 6 km <sup>20</sup>
tramvajová		tramvajová síť je v Česku provozována ve městech: Brno, Liberec a Jablonec nad Nisou, Most a Litvínov, Olomouc, Ostrava, Plzeň, Praha <sup>21</sup> .
trolejbusová		trolejbusová síť je v Česku provozována ve městech: Brno, České Budějovice, Hradec Králové, Chomutov a Jirkov, Jihlava, Mariánské Lázně, Ostrava, Pardubice, Plzeň, Teplice, Ústí nad Labem, Zlín a Otrokovice.
lanová		v Česku je 7 osobních lanovek pozemních a 97 osobních lanovek visutých. V minulosti hojně visuté lanovky nákladní byly ve většině případů zrušeny <sup>22</sup> .

Tab. 2-21. Dráhy a jejich kategorie v Česku.

Významným fenoménem budoucnosti železniční sítě je výstavba vysokorychlostních tratí označovaných také jako rychlá spojení. Jejich stavba je motivována jednak snahou o rychlé vnitrostátní i mezistátní spojení a jednak snahou o zvýšení kapacity stávajících tratí odstraněním nejrychlejších vlaků (viz obr. 2-22) pro možnost zvýšení počtu nákladních vlaků – z tab.

<sup>17</sup> Dle Prohlášení o dráze celostátní a regionální pro rok 2015, zahrnutý jsou jen tratě v majetku ČR, délka celostátních a regionálních tratí ostatních vlastníků je marginální.

<sup>18</sup> Tato kategorie je v návrhu novely Zákon o drahách předložené Ministerstvem dopravy v říjnu roku 2014.

<sup>19</sup> Dle evidence Drážního úřadu ČR k 1. 7. 2008 zveřejněné v [Číhal, 2009].

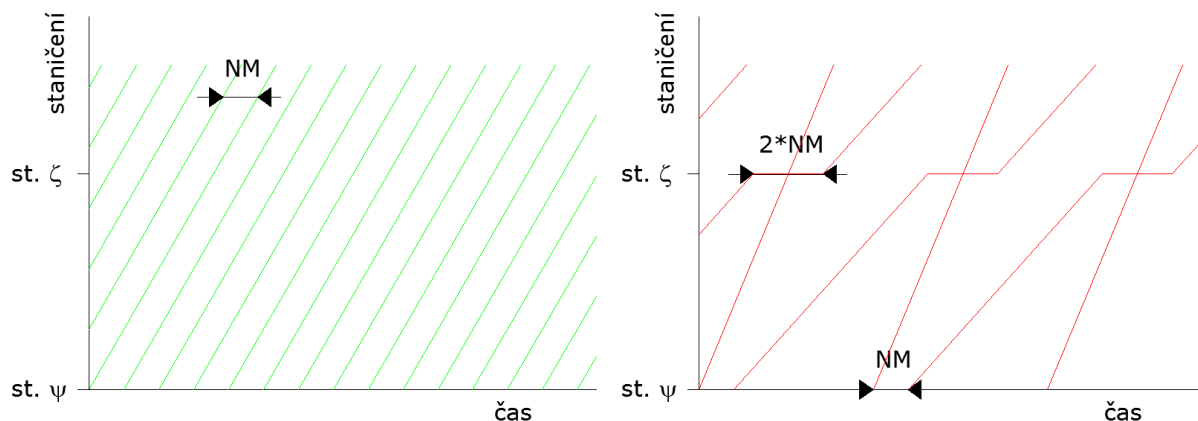
<sup>20</sup> Dle informací na webu provozovatele – Dopravního podniku hl. m. Prahy

<sup>21</sup> Nejsou zahrnuty obce a města, do nichž zasahují příměstské tratě z uvedených měst

<sup>22</sup> Dle seznamu lanových drah na wikipedii.



2-16 je zřejmé, že převedení např. 20 % silniční nákladní dopravy na železnici nákladní výkon železnice zdvojnásobí. Páteří bude vysokorychlostní trať Praha – Brno – Přerov, na kterou budou navazovat další vysokorychlostní i konvenční větve [Šlegr, 2012].



*Obr. 2-22. Grafikon jedné traťové koleje na dvojkolejně trati. Vlevo tzv. rovnoběžný grafikon, vpravo grafikon s vlaky různých rychlostí a tím vyvolanou nutností předjíždění ve stanicích  $\psi$  a  $\zeta$ . Orientačně vyznačeno i následné mezidobí, což je minimální odstup mezi vlaky daný koncepcí zabezpečovacího zařízení, kdy v jednom oddílu (úseku) trati může být zároveň jen jeden vlak – výpočet se provádí dle předpisu SŽDC D23. Příkladem provozu s rovnoběžným grafikonem je dráha železniční speciální – metro.*

## 3 OPTIMÁLNÍ DOPRAVNÍ SÍŤ

Cílem optimalizace je najít optimální (nejlepší) řešení, kvůli čemuž je nutno určit kritérium, podle kterého se určí, zda nalezené řešení je dobré či špatné, resp. nejlepší nebo nejhorší. Je tedy nezbytné určit, co se od dopravní sítě požaduje. Z podstaty se jedná o subjektivní pohled a navíc pohled různých skupin uživatelů. Jiný pohled na průjezdnost komunikace pravděpodobně má řidič, který ji projíždí a který ji chce projet co nejrychleji, jiný pohled cestmistr, který ji má na starost a má omezený rozpočet, a jiný pohled občan, který vedle komunikace bydlí a chce mít svůj klid. Tyto skupiny se přitom obecně mohou překrývat a docházet tak k efektu každý chce dálnici, ale ne u svého domu, v anglicky mluvícím světě označovaném NIMBY (Not In My Back Yard, ne na mém dvorku).

Základní přehled uvažovaných požadavků včetně jednotek počítatelných (měřitelných) veličin je v následujícím seznamu:

- Z hlediska uživatele – řidiče, resp. cestujícího
  - doba jízdy [s]
  - délka jízdy [km]
  - cena jízdy (spotřeba PHM, mýto) [Kč]
  - bezpečnost (průjezd "vyhlášenými" nehodovými lokalitami)
  - spolehlivost [pravděpodobnost dosažení cíle cesty]
  - příjemnost, pohodlnost, dobrý dojem z trasy, kvalita vozovky apod. [?]
  - nutnost přestupů<sup>23</sup> (prostředí terminálu, co se stane v případě ujetí přípoje atd.) [?]
- Z hlediska správce komunikace
  - náklady životního cyklu (investiční náklady, náklady na údržbu) [Kč]
  - administrativní a organizační překážky (projednání stavebních úprav)
- Z hlediska sousedů
  - negativní ovlivnění životního prostředí – hluk, prach, škodlivé plyny [?]
  - zábor veřejného prostranství, resp. krajiny [?]

Je zřejmé, že výběr kritéria ovlivní výsledek hodnocení, resp. výsledek optimalizace.

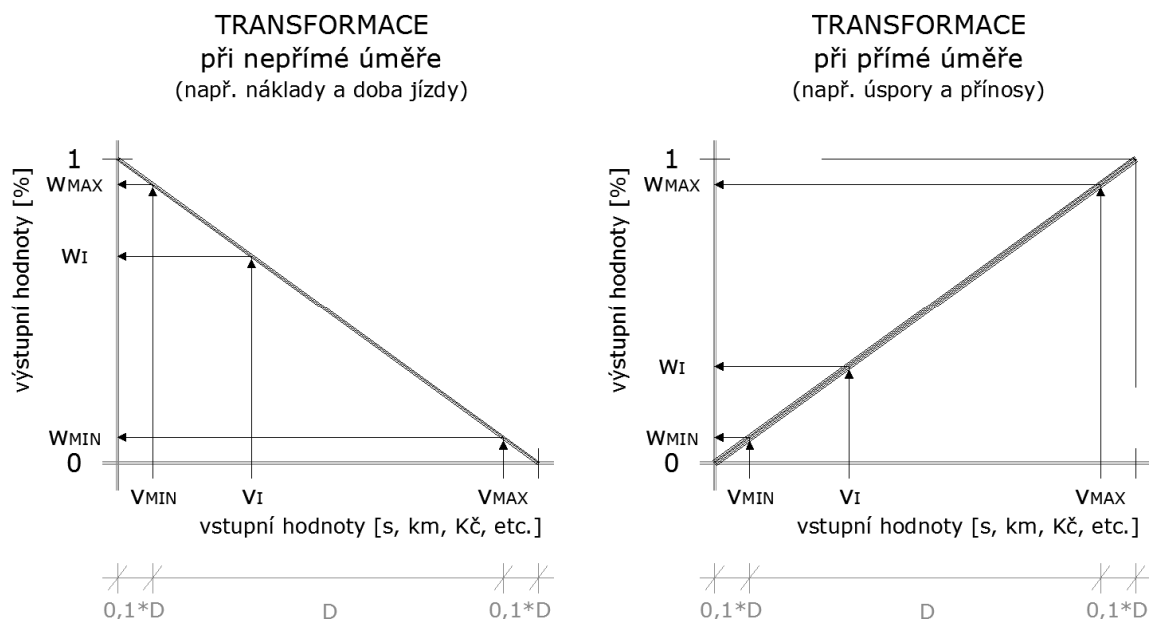
Uvedená kritéria lze kombinovat, tzn. vytvořit multikriteriální hodnocení. Jednou z metod je hodnocení dle Metodického pokynu Ministerstva dopravy ČR 11/1995. Jinou možností je finanční ohodnocení všech kritérií, což je základem metodiky HDM-4.

### 3.1.1 Multikriteriální hodnocení dle Metodického pokynu 11/1995

Multikriteriální hodnocení je založeno na převedení všech kritérií na společnou jednotku která nabývá 0 až 100 %, přičemž v rámci každého kritéria se nejhorší hodnocená varianta ohodnotí hodnotou blízkou 0 % a nejlepší hodnotou blízkou 100 %<sup>24</sup>. V tomto duchu se postupuje také u kritérií, které nelze vyjádřit číselně, ale pouze slovním ohodnocením, resp. známkou 1 až 5.

<sup>23</sup> Přímé linkové vedení jako optimalizační kritérium použil Čejka [2008] při řešení přiřazovací úlohy – výstupem byl návrh takového linkového vedení českobudějovické MHD, při kterém musí přestupovat nejméně cestujících.

<sup>24</sup> Přesněji 91,7 % a 8,3 %, protože 0 % dle Pokynu 11/2005 odpovídá nejmenší hodnotě minus desetina rozpětí nejmenší hodnota – největší hodnota, 100 % obdobně nejvyšší hodnotě plus desetina rozpětí nejmenší – největší.



*Obr. 3-1. Transformace vstupních hodnot (vodorovná osa) v rozličných veličinách/jednotkách na univerzální jednotku 0 až 1. Vlevo nepřímá úměra, kdy nižší vstupní hodnota je lepší; vpravo přímá úměra, kdy vyšší vstupní hodnota znamená lepší užitek. Překresleno dle Pokynů 11/1995*

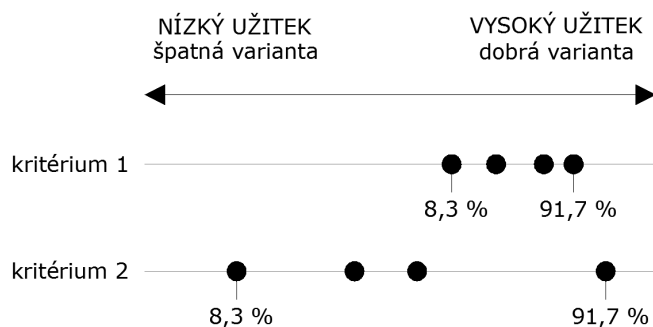
Dalším krokem je přidělení vah (kvalitativních multiplikátorů) jednotlivým kritériím. Hodnoty převedené na společnou jednotkou se přenásobí váhami dle jednotlivých kritérií a sečtou se. Součty pak odpovídají souhrnnému užiteku té které varianty. Kritéria a závazné hodnoty vah dle Pokynů jsou:

Kritérium	váha
<b>technické hledisko</b>	<b>0,245880</b>
doba výstavby	0,029621
náročnost přípravy	0,032568
riziko technické proveditelnosti	0,043928
vliv geometrie na odvodnění	0,027895
možnost etapovosti výstavby	0,029333
délka navazujících komunikací	0,023222
protihluková opatření	0,017830
náročnost správy a údržby	0,024876
využití stávajících komunikací po dobu výstavby	0,016607
<b>dopravní hledisko</b>	<b>0,296669</b>
provozní náklady uživatele	0,052566
dopravní náročnost	0,057770
možnost objízdných tras	0,027594
splnění dopravního účelu	0,091340
riziko bezpečnosti provozu	0,067399
<b>ekonomické hledisko</b>	<b>0,251131</b>
náklady na přípravu	0,037449
náklady na výstavbu	0,077102

náklady na provoz, údržbu a opravy	0,059038
náklady na příspěvky jiným investorům a obcím	0,030400
náklady na ochranu ŽP a stávající funkci sídel	0,047142
<b>hledisko průchodnosti územím</b>	<b>0,206320</b>
průchodnost trasy ve vazbě na projednání	0,101350
splnění územně-technických cílů	0,104970
<b>CELKEM</b>	<b>1,000000</b>

Z uvedeného seznamu je patrné, že dopravně-inženýrské ukazatele se do hodnocení dostávají jen nepřímo. K tomu je třeba poznamenat, že se jedná o pokyn výslovně pro hodnocení variant tras pozemních komunikací; při hodnocení konfigurace dopravní sítě by bylo možno a nutno kritéria pozměnit.

Nevýhodou tohoto postupu je, že rozestup mezi nejhorší a nejlepší variantou může být pro různá kritéria výrazně odlišný, ale vždy mu bude odpovídat rozestup 0 až 100 % společné jednotky. Důvodem je relativní posuzování vztahované jen k přeloženým variantám, nikoli k nějakému obecně špatnému a dobrému výsledku. Kvůli tomu lze pořadí variant ovlivnit i návrhem např. hodně špatné varianty. Řešením by tedy bylo vytvoření etalonů – obecně dobré a špatné varianty, které vytvoří hodnotící interval, což je ale obecně problém, protože vlastnosti, resp. postup pro vytvoření těchto okrajových variant nemusí být známé.



Obr. 3-2. 4 varianty mohou být vyrovnané v jednom kritériu, zatímco v jiném mohou být velmi nevyrovnané – přesto obě kritéria mají po převodu na společnou jednotku 0 až 100 % stejný rozsah.

### 3.1.2 Finanční ohodnocení všech kritérií

Pokud je možné všechna kritéria ohodnotit finančně, pak je možné snadno sečíst celkové náklady a seřadit varianty podle nákladů, resp. přínosů. Je tedy nezbytné znát cenu času, cenu nepoškozeného životního prostředí, cenu lidského života a zdraví atd. Přitom je potřeba uvažovat, že existuje jak jakási objektivní složka (cena léčení), tak složka objektivní (být zraněný je otrava).

Finanční ohodnocení všech kritérií používá mj. HDM-4, pro který byl Ministerstvem dopravy vydán ceník<sup>25</sup>, z něhož je pro názornost vybráno:

<sup>25</sup> Příloha C Prováděcích pokynů (Ministerstva dopravy ČR) pro hodnocení ekonomické efektivity projektů silničních a dálničních staveb z května 2014.



#### Ocenění času při přepravě zboží (za vozidlo a hodinu)

lehké nákladní automobily	52 Kč
středně těžké nákl. automobily	283 Kč
těžké nákladní automobily	660 Kč
nákladní soupravy	1029 Kč

#### Ocenění času cestujících (pravděpodobně za 1 hodinu – neuvedeno)

služební cesta	500 Kč
cesta do zaměstnání	230 Kč
soukromá cesta	165 Kč
rekreační cesta	215 Kč

#### Ztráty z dopravních nehod na 1 účastníka dopravní nehody v roce 2012

úmrť	19 022 tis. Kč
těžké zranění	5 001 tis. Kč
lehké zranění	433 tis. Kč
jen hmotná škoda	227 tis. Kč

#### Náklady na dopravní hluk (dle průměrné ekvivalentní hladiny hluku, na osobu a rok)

51 dB	258 Kč
61 dB	3 098 Kč
71 dB	7 488 Kč
81 dB	12 239 Kč

#### Náklady na emise

(1 t PM – prachové částice, VOC – těkavé organické sloučeniny, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>)

PM <sub>2,5</sub>	20 207 253 (soustředěná zástavba) až 3 459 788 Kč (venkov)
VOC	56 802 Kč
NO <sub>x</sub>	165 244 Kč
SO <sub>2</sub>	211 718 Kč
CO <sub>2</sub>	594 (pro roky 2010-19) až 1895 Kč (pro rok 2050)

#### Náklady na údržbu (m<sup>2</sup>)

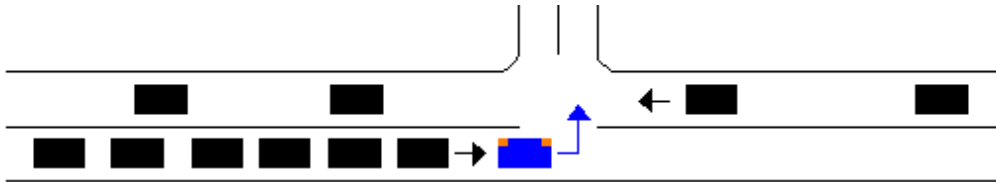
asfaltové vozovky	40 až 265 Kč
betonové vozovky	40 až 70 Kč

K uvedeným je potřeba připočítat také cenu za kilometr jízdy vozidla, které se skládá z nákladů na pohonné hmoty a maziva, režijní náklady na provoz vozidla, nákup, údržbu a opravy vozidla a mzdové náklady na řidiče. Náklady jsou očištěny od daní, proto např. za Natural 95 se počítá 16,1 Kč/l.

### 3.1.3 Užitek jednotlivce versus obecný užitek

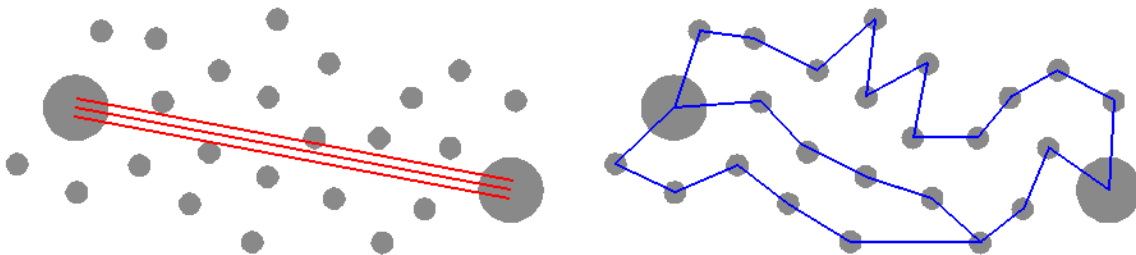
Co je výhodnější pro společnost jako celek, nemusí být nutně výhodné pro každého jednotlivce. V dopravě to znamená, že zrychlení cesty pro velkou část obyvatel pocítí velmi negativně malá část obyvatel, pro kterou se doprava výrazně zhorší, nebo dokonce prakticky znemožní.

Příkladem opatření, které může vyvolat pochybnost, je zákaz levého odbočení. Řidiče, který potřeboval odbočit vlevo, přinutí toto opatření vykonat nějakou zajižďku. Naopak řidičům, co jedou přímo, ušetří toto opatření zbytečné čekání za odbočujícím vozidlem, viz obrázek 3-3.



*Obr. 3-3. Levé odbočení ze silně zatížené na málo zatíženou komunikaci. Rozšíření jízdního pásu o odbočovací pruh nemusí být možné např. z důvodu zástavby.*

Snad ještě větší vliv než v dopravě individuální má rozpor mezi užitkem jednotlivce a celku v dopravě veřejné, kde se doprava sdružuje do linek, resp. spojů. Dilema, zda má autobus vykonat závlek, zda má rychlík zastavit v menším městě, či zda má raději jezdit jediný, ale poloprázdný noční vlak, nebo plně obsazený posilový vlak v již tak hustém špičkovém intervalu, je běžným koloritem diskusí o změnách jízdních řádů.



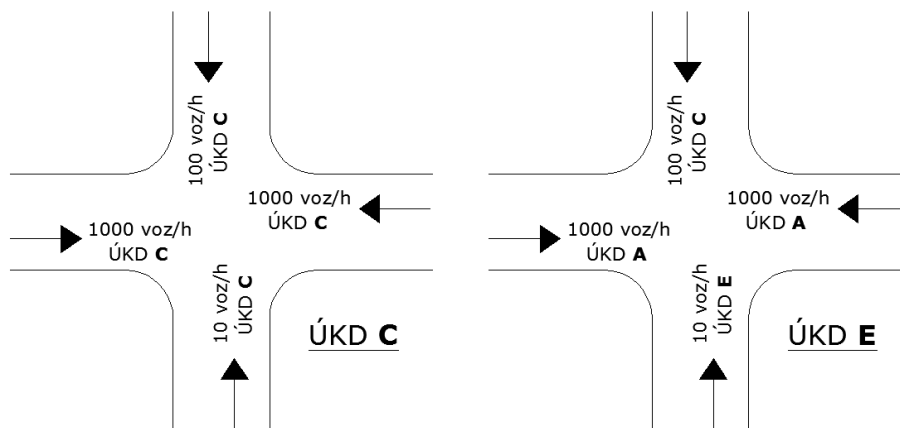
*Obr. 3-4. Veřejná doprava mezi dvěma městy – levá varianta s expresní linkou je lepší pro větší část cestujících (rychlá přeprava silného přepravního proudu), pravá varianta pro menší část cestujících, tzn. pro obyvatele vesniček v první variantě zcela neobsložených.*

Obdobná diskuze se vede, resp. vedla i pro posuzování pozemních komunikací a jejich křižovatek z hlediska kapacity a kvality dopravy. České technické předpisy (viz kap. 4.2) požadují posouzení jednotlivých vjezdů do křižovatky s tím, že o výsledné úrovni kvality dopravy A÷F rozhodne nejhorší vjezd (výjimkou je křižovatka komunikací různých kategorií, resp. tříd, kdy jsou pro jednotlivé komunikace požadovány různé úrovně kvality dopravy). Na obr. 3-5 je patrná jistá kontroverze tohoto postupu, kdy při porovnání dvou variant vyjde formálně lepší ta, která je pro naprostou většinu vozidel horší. Jednoduchou alternativou postupu dle předpisů použil Kokeš [2012], který pro srovnání variant použil průměr doby zdržení vážený podle počtu vozidel daného vjezdu.

Rozhodnutí o preferenci užitku jednotlivců či celé společnosti je přenecháno vědám společenským. Optimalizace by proto měla umožňovat výpočet s různými scénáři, které se odlišují politickým zadáním a následně statistickým popisem.

- Při uvažování užitku celku je vhodné hledat minimum průměrného či celkového (součet všech za všechny osoby) cestovního času.
- Při uvažování přijatelného užitku co největšího počtu jednotlivců je vhodné hledat minimum počtu jednotlivců, kteří dosáhnou předem stanovené hranice, ať už absolutně (x minut), nebo relativně (x % průměrné doby jízdy).

- Při uvažování co největšího užitku přijatelného podílu jednotlivců je vhodné hledat minimum cestovní doby, které dosáhne předem stanovené množství jednotlivců.



*Obr. 3-5. Stanovení výsledné ÚKD dle českých technických předpisů. Levá křižovatka vychází lépe (ÚKD C), přestože na pravé křižovatce je pro většinu vozidel ÚKD lepší.*



## 4 DOPRAVNĚ-INŽENÝRSKÉ VÝPOČTY

Pro kvantitativní i kvalitativní posouzení dopravní sítě je nutné použít některý z postupů dopravního inženýrství. Kvantitativní posouzení obnáší výpočet kapacity a porovnání kapacity s intenzitou, tzn. určení, zda očekávaný počet vozidel sítě projede. Kvalitativní posouzení obnáší posouzení řady kritérií zmíněných v kap. 3, zejména doby zdržení. Pro zpřehlednění lze dopravně-inženýrské postupy rozdělit na modely a výpočty dle technických předpisů.

### 4.1 Matematické modelování dopravy

Možností, jak predikovat chování cestujících, nákladu a vozidel na dopravní síti, je použít modelování dopravy, tzn. náhradu skutečného dopravního provozu matematickým modelem. Modelem nějakého reálného objektu se nazývá jiný objekt, který má s původním objektem (vzorem, originálem) některé shodné předem stanovené vlastnosti, podstatné pro daný účel [Tuzar, 1997, s. 29]. Tuzar také definuje různé modely:

- Fyzikální – mají stejnou fyzikální podstatu jako originál, ale jiné rozměry.
- Analogové – používají spojité procesy analogické spojitým procesům v originále, fyzikální podstata ale může být jiná.
- Geometrické – zachovávají vnější tvar, vnitřní procesy jsou ale odlišné.
- Verbální – slovní popis podstatných parametrů originálu.
- Simulační – diskrétní varianta analogových modelů.
- Matematické – matematický popis podstatných parametrů originálu.

Zajímavé je zdejší použití termínu simulační model jako samostatného typu modelu vedle např. modelu matematického. Naopak Křivda [2013] definuje simulaci jako experimentování s modelem. Každopádně i přes tuto terminologickou nejistotu lze tvrdit, že pro modelování dopravy se používají modely matematické.



*Obr. 4-1. Výjimka potvrzující pravidlo – fyzikální model brněnského hlavního nádraží slouží pro výuku dopravních zaměstnanců a umožňuje simulovat různé dopravní situace. Uspořádání kolejiště v modelu je oproti realitě odlišné. Foto poskytl firma Signal Projekt s.r.o.*

Existuje řada různých dopravních (přepravních) modelů vzniklých pro různé typy úloh a s využitím různých předpokladů. Modely, které se používají pro potřeby dopravního inže-



nýrství, lze rozdělit na dva základní: **Modely dopravního proudu a strategické modely dopravní sítě.**

Modely se běžně označují i dle jejich podrobnosti [HCM2010, 2010; Súkenník, 2013; Křivda, 2013]

- Makroskopické, založené na výpočtu celého dopravního proudu, resp. jeho agregovaných charakteristik, jako jsou rychlost, hustota či intenzita.
- Mikroskopické, založené na výpočtu jednotlivých vozidel, které navzájem na sebe reagují.
- Mesoskopické, jejichž výpočet se týká jednotlivých vozidel (mikroskopický pohled), ale vztah mezi nimi je definován makroskopicky – dle vztahů mezi agregovanými charakteristikami dopravního proudu.
- Hybridní, u kterých běží zároveň makroskopický i mikroskopický výpočet, např. kritické uzly se počítají mikroskopicky a zbytek sítě makroskopicky.

Kromě toho lze v literatuře dohledat i obecnější definici termínů mikroskopický a makroskopický. Apeltauer [2011] tvrdí, že *agregované (makroskopické nebo-li globální) modely analyzují dopravní soustavu na celospolečenské úrovni tj. národní či nadnárodní a umožňují zkoumání a posuzování vzájemného působení mezi dopravou a jejím socioekonomickým prostředím. Agregované modely se nesnaží vysvětlit individuální chování, ale jednotkou jejich analýzy je zpravidla určité geografické území tzv. zóna. Disagregované (mikroskopické) modely analyzují dopravní systém nebo jeho jednotlivé prvky na úrovni menšího geografického celku (např. kraj, město), s ohledem na místní podmínky a socioekonomické aktivity obyvatelstva. Disagregované modely jsou založeny na zkoumání chování jednotlivců (popř. domácností).*

Křivda [2013] dále definuje simulační modely statické/dynamické podle toho, zda se v průběhu simulace mění proměnné parametry, nebo zda se nastavují pouze na začátku simulace a následně spojitě/diskrétní podle toho, zda změna parametrů nastává průběžně, nebo zda se mění jenom na konci kroku. Všechny modely pak rozlišuje na deterministické a stochastické podle toho, zda v nich figuruje nějaká náhodná proměnná, nebo ne – deterministický model by měl při opakovaných spuštěních dopadnout vždy stejně, naopak stochastický model by měl pod vlivem náhodného vstupu (vstupů) dopadnout jinak - proto se simulace provádí vícekrát a za výsledek se uvede statistické vyhodnocení dílčích výsledků (průměr, maximum atd.) [Súkenník, 2013].

#### 4.1.1 Věrohodnost dopravních modelů

Společným jmenovatelem obou hlavních druhů dopravních modelů je nutnost jejich **kalibrace** a **validace**. Kalibrace je nastavení vstupních parametrů dle známého (např. změřeného) chování cestujících, přepraveců a vozidel. Například v Praze lze očekávat agresivnější styl jízdy (rychlejší rozjezdy při červenožlutém signálu) než na venkově – podle toho by se mělo změnit výchozí (defaultní) nastavení reakčních dob. Validace je kontrola výstupů podle naměřených dat jiných než použitých při kalibraci. Příkladem může být délka fronty na křižovatce. Kalibrace a validace se z podstaty (nutnost změřených dat) provede na modelu stávajícího stavu, ať co se týče dopravního zatížení nebo uspořádání dopravní sítě. Pokud validace modelu stávajícího stavu vyhoví, tak se prohlásí, že model je sestaven správně a že tedy správné budou i výsledky modelu výhledového stavu.

V Česku neexistuje předpis upravující požadavky na validaci dopravního modelu. V roce 2013 byla vydána Příručka pro tvorbu a hodnocení mikroskopických simulací, což je metodika certifikovaná Ministerstvem dopravy ČR. Týká se pouze mikroskopických modelů do-

pravního proudu a je poměrně obecná. Byla výsledkem výzkumného projektu TA ČR<sup>26</sup> a jedním z členů autorského týmu byl i autor této disertační práce. V současné době probíhá obdobný projekt pro strategické modely<sup>27</sup>.

Ze zahraničních předpisů je vhodné jmenovat britský DMRB (Design Manual for Roads and Bridges), který široce definuje, jak má vypadat zpráva o kalibraci modelu – dá se říct, že by podle této zprávy měl být jiný projektant schopen zakódovat stejný model se stejnými výsledky. Kromě toho definuje i konkrétní požadavky na validaci, tzn. limity, podle kterých lze formálně jednoznačně konstatovat, že model byl úspěšně zvalidován, nebo nikoli.

DMRB doporučuje provést srovnávací analýzu mezi dvěma soubory dat – vymodelovanými a skutečnými. Koeficient korelace udává míru adekvátnosti modelu, sklon nejhodnější regresní čáry ukazuje, do jaké míry jsou modelované hodnoty nad, resp. pod odhadnutými. Přípustné hodnoty jsou pro koeficient korelace nad 0,95, pro sklon regresní čáry v intervalu 0,9 až 1,1. Hodnota 1,0 je v obou případech výborná. Pokud je ovšem spektrum intenzit široké, tak výsledky této analýzy budou zavádějící.

Další možnost dle DMRB je použít statistiku GEH<sup>28</sup>:

$$GEH = \sqrt{\frac{(M - C)^2}{(M + C) / 2}} \quad (4.1)$$

kde:

*GEH* je GEH statistika  
*M* intenzita spočítaná modelem  
*C* intenzita naměřená v terénu

Hodnoty GEH mohou být počítány jak pro jednotlivé komunikace, tak pro skupinu komunikací. Limity pro rozdíl intenzit a cestovní časů jsou pak následující:

<u>limit</u>	<u>akceptovatelný počet případů</u>
intenzita v limitu 15 % pro 700 ÷ 2700 voz/hod	> 85 % profilů
intenzita v limitu 100 voz/hod pro méně než 700 voz/hod	> 85 % profilů
intenzita v limitu 400 voz/hod pro více než 2700 voz/hod	> 85 % profilů
intenzita přes kordon <sup>29</sup> (min. 5 komunikací) v limitu 5 %	(téměř) všechny kordony

<sup>26</sup> TA01031193, Aplikace mikroskopických simulačních nástrojů k evaluaci a optimalizaci dopravně-inženýrských řešení silniční infrastruktury – validace nástrojů a stanovení standardů; 2011-2013, příjemce AF-CITYPLAN s.r.o. (řešitel Ing. Petr Hofhansl, Ph.D.), další účastník VUT v Brně, Fakulta stavební (řešitel doc. Ing. Tomáš Apeltauer, Ph.D.).

<sup>27</sup> TA04031189, Minimální standardy návrhu modelů pro dopravní plánování, od září 2014, příjemce Centrum dopravního výzkumu, v.v.i., další účastníci AF-CITYPLAN s.r.o. a SUDOP PRAHA a.s.; projekt není uveden v ISVAV, pouze v seznamu podpořených projektů 4. výzvy TA ČR.

<sup>28</sup> Název GEH je dle wikipedie (DMRB v tomto ohledu mlčí) odvozen od jména Geoffrey E. Havers, který byl v 70. letech dopravním inženýrem v Londýně. Stejný zdroj upozorňuje, že GEH statistika je podobná (ale nikoli totožná) s chí-kvadrát statistickým testem. Vhodná je nejenom pro validaci dopravního modelu, ale i pro porovnání různých metod měření, např. ruční vs. automatické.

<sup>29</sup> Sůkenník (2013) používá anglický originál "screenline" s tím, že kordon je speciální případ screenline, který je uzavřený okolo nějaké oblasti, např. okolo města, kdy jde sledovat doprava z města a do města (tedy součet vnější a tranzitní dopravy)

statistika GEH – intenzita: $GEH < 5$	> 85 % profilů
statistika GEH – intenzita přes kordon: $GEH < 4$	(téměř) všechny kordony
čas v limitu 15 % (avšak max. 1 minuta)	> 85 % cest

I přes snahu sjednotit a formalizovat validaci modelů je korektnost modelu do značné míře závislá na osobě, která model vypracovala. Velké množství parametrů, které lze v modelu nastavit či zcela ignorovat, dává autorovi modelu možnost vystihnout zvláštnosti modelované sítě či uzlu. Zároveň mu to ale dává možnost ovlivnit výsledek tak, aby např. vyhověl zájmu zadavatele studie.

#### 4.1.2 Strategické modely dopravní sítě

Cílem strategických modelů je vypočítat poptávku po dopravě a přidělit ji na (multimodální) dopravní síť, tzn. určit zatížení jednotlivých komunikací, křižovatek a nebo také linek a zastávek hromadné dopravy.

Model se dá rozdělit do 4 kroků (stupňů), pročež se nazývá také čtyřstupňový, byť některé z těchto stupňů mohou vynechány, sloučeny či prohozeny. Tyto čtyři stupně lze popsat následujícím způsobem [Medelská, 1991; Landa, 2003; Martalos, 2008; DMRB]:

- **Kolik?** Jde o určení počtu osob, které cestují z každé zóny a do každé zóny. Pro určení zdrojové dopravy lze vycházet např. z počtu obyvatel, kdy se u lidí v produktivním věku předpokládá pravidelná cesta do práce a u mládeže pravidelná cesta do školy. Cílová doprava je pak dána počtem pracovních, resp. studijních příležitostí. Odpoledne se pak zdrojová a cílová doprava prohodí. Lepší je vycházet z průzkumu chování obyvatelstva, kdy je sociologicky vybraný vzorek dotazován, jak často jezdí tam či onam, a tím se dají do sumy odjíždějících zahrnout přesnější informace zahrnující např. nezaměstnanost, pravidelné ježdění za sportem, přáteli apod<sup>30</sup>. Zjednodušeně lze vycházet pouze z počtu obyvatel zóny a tím zanedbat nerovnoměrnost cest tam a zpět.
- **Kam?** Jde o určení matic přepravních vztahů mezi všemi dvojicemi zón. Vycházet lze např. z gravitačního modelu, který je odvozen z gravitačních sil mezi skutečnými tělesy – gravitační (přitažlivá) síla se zvětšuje s hmotností těles a snižuje s jejich vzájemnou vzdáleností. Analogicky se definuje, že s rostoucí vzdáleností sídel klesá počet cest mezi nimi, zatímco s rostoucím počtem obyvatel počet cest roste.
- **Čím?** Jde o dělbu přepravní práce (modal split), tedy rozdělení cest mezi různé druhy dopravy – pěší, cyklistická, individuální automobilová, veřejná, příp. jiné. Vycházet lze z poměru, který se stanoví např. dle znalosti stávajícího poměru jednotlivých druhů dopravy. Tento může být určen pro celou síť, nebo odlišně např. pro zóny v centru města a na předměstí.
- **Kudy?** Posledním krokem je přidělení cest na dopravní síť, tzn. určení po kterých komunikacích (linkách veřejné dopravy), tzn. po které trase se pojedje ze zóny x do zóny y. Předpokladem je, že lidé budou jezdit nejvýhodnější cestou (viz kap. 3), která se dá při znalosti parametrů sítě určit např. Dijkstrovým algoritmem (viz kap. 4.1.2.1). Postup přidělování cest na síť (zatěžování sítě) by měl respektovat fakt, že

<sup>30</sup> Medelská [1991] cituje směrový průzkum prováděný UDI Praha v roce 1975, na základě kterého je v raní špičce 87% podíl cest domov – práce a zpět, zatímco za celý den činí podíl cest domov – práce a zpět 52 %.

původně atraktivní trasa může být vlivem své atraktivity přetížena a tím dojde ke ztrátě její atraktivity.

Jak bylo naznačeno, uvedené čtyři stupně a jejich pořadí může být modifikováno. Příkladem může být třeba dělba přepravní práce, která může vycházet z atraktivnosti spojení jednotlivých zón – krok "čím?" je tedy sloučen s krokem "kudy?", kdy se zároveň hledá optimální cesta jak individuální (ne)motorovou dopravou, tak dopravou veřejnou. Přitom je potřeba mít na paměti, že výrazný vliv má socioekonomické hledisko – někdo nepoužije některý z druhů dopravy v žádném případě, ať už z či subjektivních důvodů.

Analogicky lze teoreticky modelovat i pohyb zboží, což ale naráží na obchodní vztahy, které dokážou s cíly nákladní dopravy velmi zamíchat. Obchodní vztahy také ovlivňují modal split. Ten kromě toho záleží na technologických možnostech odesílatele a příjemce, neboť ne každý závod je napojen na vlečku, nebo dokonce na vodní cestu, a naopak jsou závody, které jsou schopny stáčet jen z/do železničních cisteren, nikoli do silničních.

Validace strategického modelu se provádí na stávající síti se stávajícím zatížením dle zatížení jednotlivých hran sítě, tzn. jednotlivých komunikací či linek.

Z kroků strategického algoritmu je v této práci použit 4. krok – přidělení cest na síť/zatížení dopravní sítě s využitím Dijkstrova algoritmu, proto jsou popsány podrobněji.

#### 4.1.2.1 Dijkstrův algoritmus

Dijkstrův<sup>31</sup> algoritmus slouží k nalezení cesty nejmenšího odporu mezi jedním (výchozím) uzlem a zbylými uzly. Odpor může být délka, doba jízdy, cena apod.; odpor může být jiný v každém z obou směrů každé hrany. Postupuje se v krocích od výchozího uzlu k sousedním uzlům, přičemž se zapisuje odpor každého uzlu od uzlu výchozího. U toho uzlu, který má v daném kroku nejmenší odpor od výchozího uzlu, již s jistotou víme, že jsme našli nejkratší cestu, neboť všechny sousední uzly jsou dále než on sám.

Jistou nevýhodou Dijkstrova algoritmu ve světle další podkapitoly je nalezení pouze právě nejkratší cesty, nikoli druhé nejkratší, třetí nejkratší atd., což vychází z podstaty algoritmu.

Kromě Dijkstrova algoritmu existují i podobné algoritmy, např. Dantzigův či Floydův algoritmus [Tuzar, 1997]

Podrobný postup Dijkstrova algoritmu je v příloze A<sup>32</sup>.



Obr. 4-2. Edsger Dijkstra v roce 2002 (zdroj: wikipedia)

<sup>31</sup> Edsger Dijkstra (1930 Rotterdam, Nizozemí – 2002 Nuenen, Nizozemí; zdroj: wikipedia)

<sup>32</sup> Lze také shlédnout názorné video s ukázkou Dijkstrova algoritmu, které natočil student ČVUT David Vávra, kde uzly jsou představovány květináči a hrany jsou nakresleny křídou na kuchyňskou podlahu. Video je umístěno na youtube.com.

#### 4.1.2.2 Přiřazení cest na síť

Nechť jsme v situaci, že známe počet cest automobilem mezi zónou  $x$  a zónou  $y$  a chceme tyto jízdy přiřadit na konkrétní hrany sítě, tzn. na konkrétní na sebe navazující pozemní komunikace, tzn. na nějakou konkrétní trasu, která bude z pohledu těchto automobilistů optimální. Úlohu komplikuje několik nejistot.

- Budou řidiči znát optimální trasu?
- Budou řidiči touto optimální trasou jezdit?
- A co je vlastně ta optimální cesta?

Běžným předpokladem je, že optimální trasa je nejrychlejší, tzn., že s jejím využitím je automobilista v cíli nejrychleji, resp. může nejpozději vyjet z východiště. Automobilisté ale mohou být motivováni i jiným cílem, např. kvůli ceně mohou hledat nejkratší trasu nebo trasu vynechávající placené úseky<sup>33</sup>. Toto lze teoreticky řešit přiřazování cest částečně podle rychlosti, částečně podle délky, s rozdělením např. dle průzkumu chování obyvatel.

V době elektronických navigací, které dokáží přijímat aktuální "korekce", se dá předpokládat, že řidiči budou v čím dál větší míře znát objektivně optimální trasu, tzn. trasu která je měřitelně optimální (nejkratší, nejrychlejší). Je zřejmé, že vliv neznalosti objektivně optimální trasy je větší u hustších sítí, kde existuje více možných tras. Druhá věc je, zda automobilisté chtějí a jedou po objektivně optimální trase, nebo zda raději pojedou po nějaké trase, která je optimální z jejich (subjektivního) pohledu, protože jim je příjemná, mají ji zažitou apod. Např. Bekhor<sup>34</sup> na semináři v Brně v dubnu 2013 uvedl, že v Izraeli je vyzorováno, že významná část (bez kvantifikace) řidičů nevyužívá (objektivně) optimální trasu. Medelská [1991] uvádí 30 % řidičů, kteří cestují jinou než nejrychlejší trasou.

Další okolností je existence více tras, které mají obdobné, nebo dokonce shodné parametry. Existuje více přístupů k rozdělení zátěže mezi více dobrých tras, Medelská [1991] uvádí:

- metoda nejrychlejší trasy, tzn. všechno nebo nic – veškerá zátěž se převede na nejrychlejší trasu. V originálním textu je uvedeno metoda nejkratší trasy, přestože v textu je hovořeno o rychlosti.
- metodu přidělení na více tras – zátěž se převede na více dobrých tras, uváděno je 2 až 3 např. s využitím Kirchhoffových zákonů. Dobré trasy se vybírají dle jednoho kritéria.
- metoda omezené kapacity – jde o iterační metodu, kdy se přiděluje zátěž po částech a tím se původně atraktivní komunikace stávají dříve zatíženými a při uvažování vztahu mezi zatížením a dobou jízdy (viz kap. 3) dochází k jejich "zneatraktivnění" a tím se další zátěž přesouvá na další komunikace.

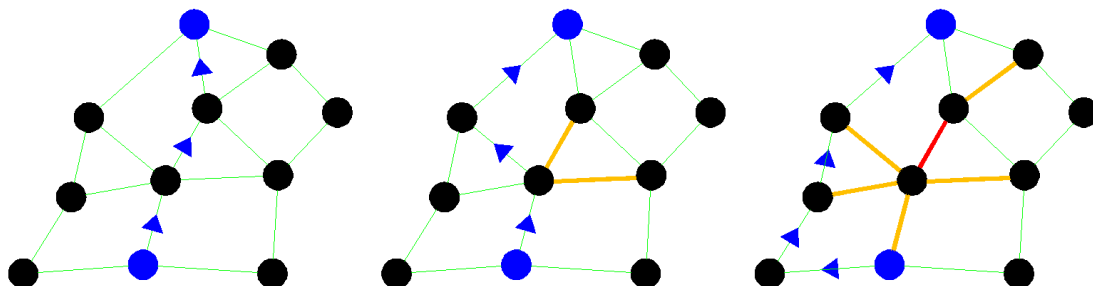
Třetí z uvedených metod má významnou výhodu v zohlednění odporu dopravní sítě, totiž faktu, že kapacita komunikací není nekonečná, ale naopak velmi ovlivňuje chování řidičů, kteří se vyhýbají přetíženým komunikacím a křižovatkám, pokud je to možné. Zároveň vylučuje najít nesmyslného výsledku, kdy by zatížení komunikací jako výsledek modelování překročilo kapacitu daných komunikací. Stejně jako chování řidičů představuje jakousi dlouhodobou iteraci, tak i dopravní model je založen na iteraci, přičemž kromě výše uvedeného, tzn. postupného zatěžování sítě, se v praxi používá i iterace plného zatížení – nultý krok přidělení tras je prováděn na nezatíženou síť, v dalších krocích je přidělováno opět plné zatížení, ovšem

<sup>33</sup> Např. vyhledávač tras mapy.cz umožňuje hledat nejkratší, nebo nejrychlejší trasu, oboje včetně/mimo placených úseků.

<sup>34</sup> doc. Shlomo Bekhor, Ph.D., ředitel Institutu dopravního výzkumu v Haifě (Izrael)



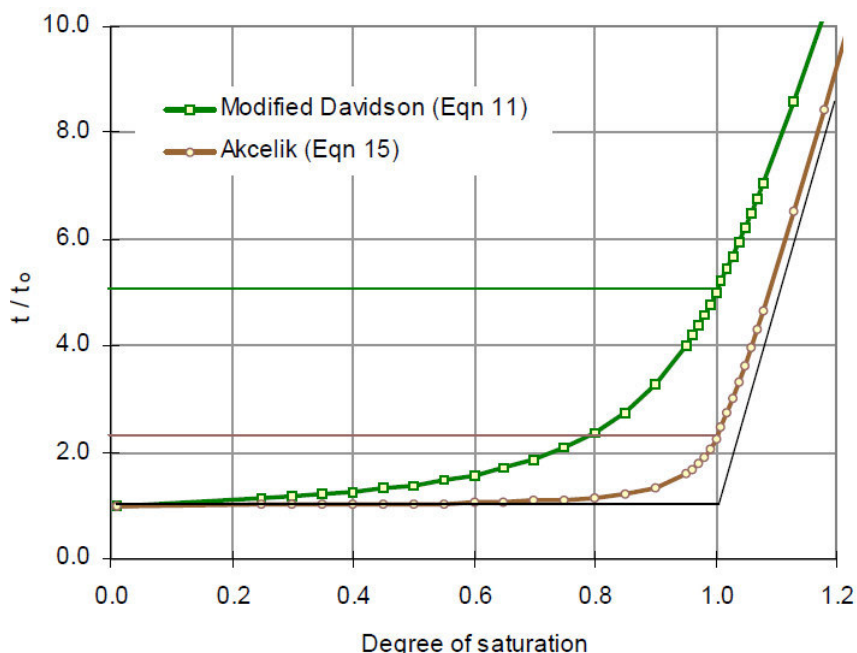
na síť zatíženou předchozím krokem. Postup se opakuje tak dlouho, dokud se přidělení nestabilizuje (dle předem zvolené podmínky). Tento postup využívá např. software Matsim<sup>35</sup>.



Obr. 4-3. Příklad postupného zatěžování dopravní sítě: První část zatížení jede nejrychlejší trasou po nezatížené síti (vlevo), druhá část zatížení již objíždí nejzatíženější hranu uprostřed sítě a pro třetí část je nejvýhodnější objet zatíženou centrální část po okraji sítě.

Odpor sítě může být vyjádřen její kapacitou, tedy prostým počtem vozidel, které mohou danou hranou nebo daným uzlem projet, nebo dobou zdržení, tedy nárůstem cestovní doby oproti prázdné komunikaci. Odpor sítě může být dán i délkou hrany, resp. cenou jízdy po hraně, resp. kombinací uvedených kritérií.

Kapacita komunikace či křižovatky může být stanovena paušálně, pro jeden jízdní pruh neovlivněný křižovatkou se standardně uvádí 1800 až 2000 vozidel za hodinu, což je i výchozí podklad pro výpočet např. světelně řízené křižovatky. Nevýhodou využití kapacity je nutnost použít postupného zatěžování, kdy po kroku, kdy je kapacita prvku vyčerpána, se již na tento prvek další zatížení nepřijímá.

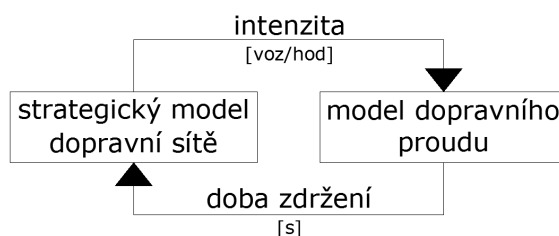


Obr. 4-4. Příklad vztahu mezi stupněm vytížení (Degree of saturation), tj. podílem intenzity a kapacity, a podílem doby jízdy po zatížené komunikaci k době jízdy po komunikaci prázdné. [Akcelik, 1991]

<sup>35</sup> Můj stručný přehled o tomto SW vychází z letní školy SW Matsim ve Znojmě v září 2013.

Doba zdržení umožňuje plynulejší samoregulaci, neboť na rozdíl od diskretních stavů kapacity vyhoví/nehoví může doba zdržení nabývat spojitéch hodnot od nuly do nekonečna. Výpočet doby zdržení lze provést vícero způsoby, běžným je stanovení závislosti doby zdržení na míře vytížení komunikace. Tuto funkci zkoumal a popsal např. Akcelik [1991] nebo Jastrzebski [2000]. Se vzrůstajícím zatížením vzrůstá doba zdržení, nárůst doby zdržení se výrazně zvyšuje při přiblížení zatížení ke kapacitě, po překročení kapacity postupně roste doba zdržení nade všechny meze. Funkce zdržení – zatížení bývají měřeny a určeny dle typů komunikací.

Přesnějším způsobem může být modelování dopravního proudu na jednotlivých komunikacích a křižovatkách (viz kap. 4.1.3). Využitelný může být i výpočet doby zdržení podle technických předpisů (viz kap. 4.2). Výstup ze strategického modelu (počty vozidel) se stává vstupem pro model dopravního proudu, jehož výstup (doba zdržení) se stane vstupem pro další iteraci strategického modelu a tak cyklicky dále dle obr. 4-5.



*Obr. 4-5. Vnoření modelu dopravního proudu do strategického modelu – iterace přidělení cest na síť.*

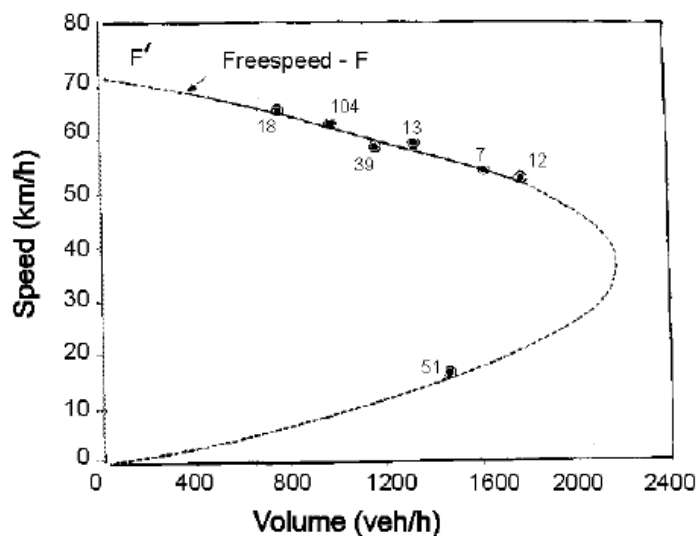
Pro zatížení dopravní sítě je také důležitý čas cesty. U jednodušších a v praxi běžných modelů se čas cesty neuvažuje a pracuje se pouze s celodenní nebo jednohodinovou intenzitou. Sofistikovanější modely umožňují přidělovat cesty na síť nejenom z hlediska trasy, ale i z hlediska času. Pokud jede hodně osob např. v 7:30, dojde v tomto čase k prodloužení jízdnicích dob a v další iteraci si lidé hledají volnější časy s příjezdem v určené toleranci. Střední cestou je tvorba modelu zvláště na ranní a odpolední špičku, neboť komunikace a křižovatky nemusejí být pro oba směry stejně kapacitní.

### 4.1.3 Modely dopravního proudu

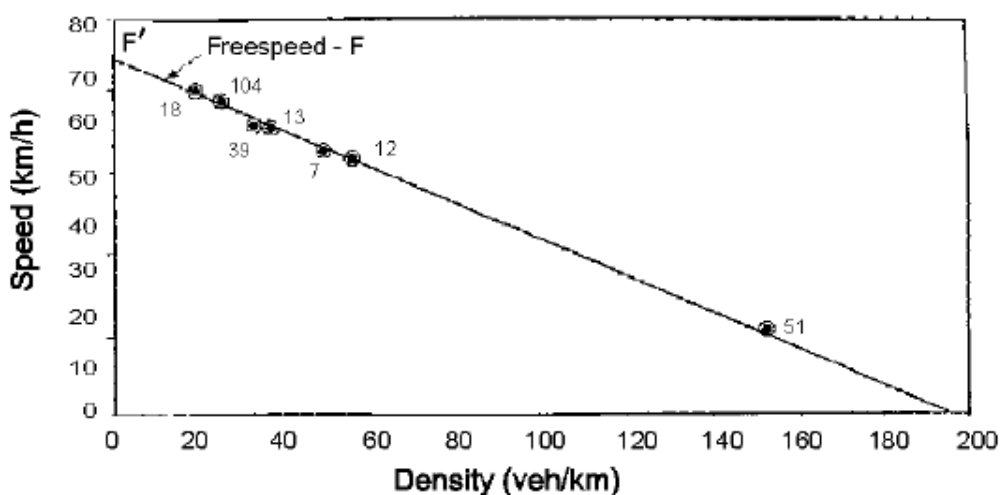
Modely dopravního proudu slouží ke zkoumání chování vozidel jedoucích za sebou, tedy tvořících dopravní proud. Makroskopický přístup je symbolizován především tzv. fundamentálními vztahy mezi rychlostí, hustotou a intenzitou dopravního proudu. Význam těchto veličin je patrný z jejich jednotek: rychlost  $V$  [km/hod], hustota  $H$  [voz/km] a intenzita  $I$  [voz/hod]. Vztah mezi uvedenými veličinami je dle vztahu 4.2.

$$I = V * H \quad (4.2)$$

Zřejmě s prvním popisem uvedených fundamentálních vztahů přišel v roce 1935 Green-shields, který provedl měření 100 skupin za sebou jedoucích vozidel, z nichž vytvořil tolik známé grafy [Hall, 2011].



Obr. 4-6. Vztah mezi rychlostí (speed) a intenzitou (volume) dle Greenshieldse [Hall, 2011]



Obr. 4-7. Vztah mezi rychlostí (speed) a hustotou (density) dle Greenshieldse [Hall, 2011]

Mikroskopický přístup může založen na:

- modelu následného vozidla
- celulárním automatu
- modelu kolon

Model následného vozidla je definován vztahem mezi jízdou vozidla a jízdou vozidla jedoucím před ním. Jízda vozidla může být popsána jeho polohou  $x$  [m], rychlostí  $v$  [m/s], zrychlením  $a$  [m/s<sup>2</sup>] a ryvem  $j$  [m/s<sup>3</sup>]. Přitom rychlost je derivací polohy za čas  $t$  [s], zrychlení je derivací rychlosti za čas a ryv je derivací zrychlení za čas.

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (4.3)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt} \quad (4.4)$$



$$j = \frac{d^3 x}{dt^3} = \frac{d^2 v}{dt^2} = \frac{da}{dt} \quad (4.5)$$

Pokud tedy budeme všechny veličiny považovat za první až třetí derivaci polohy dle času, pak můžeme zjednodušit vztah mezi jízdou vozidel na:

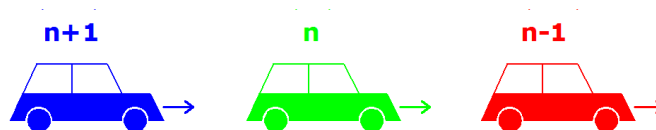
$$x_N = f(x_{N-1}) \quad (4.6)$$

kde:

$x_{N-1}$  je zrychlení (n-1)-tého vozidla, tzn. vozidla vedoucího  
 $x_N$  zrychlení n-tého vozidla, tzn. vozidla následného

Chování vozidla se z vedoucího přenáší na následné vozidlo (následné reaguje na chování předcházejícího), které je vedoucím pro další a tak dále. Pro zvláštní případy výzkumného charakteru, které jsou zaměřeny na samotné chování dopravního proudu, nikoli na chování dopravního proudu na nějaké konkrétní komunikaci, se používají také uzavřené systémy, kdy vozidla jezdí po kruhu (oválu atd.) a žádné vozidlo tak není poslední, resp. první – výchozím stavem systému jsou zvolená rychlost a zvolené rozestupy mezi vozidly.

Existuje řada modelů, které se snaží co nejrealističtěji definovat funkci (vztah 4.6), tedy vztah určující zrychlení následného vozidla v závislosti na chování vedoucího vozidla. Jedná se např. o Wiedemannův a Gippsův model; podrobnější soupis sestavil např. Apeltauer [2010].



Obr. 4-8. Vedoucí a následná vozidla.

V železničním prostředí je častější zabezpečená jízda, tzn. strojvedoucí zpravidla neřídí jízdu vlaku tak jako řidič na silnici dle rozhledu, resp. dle jízdy předcházejícího (vedoucího) vozidla, ale dle pokynů zabezpečovacího zařízení, resp. dopravních zaměstnanců (výpravčích, signalistů apod.). Přesto je strojvedoucí schopen do jisté míry optimalizovat jízdu vlaku tak, aby díky své předvídavosti mohl omezit zbytečné rozjezdy a brzdění. V rutinním provozu jsou i systémy automatického, resp. automatizovaného vedení vlaku, které přímo řídí jízdu vlaku tak, aby při požadované jízdě době a známém profilu tratě byla jízda nejplynulejší, resp. s nejmenší spotřebou trakční nafty nebo elektřiny. Příkladem v Česku je systém AVV používaný na tratích SŽDC nebo systém MATRA v pražském metru. Řízení a optimalizaci lze provádět i na centrální úrovni, tzn. nikoli pouze izolovaně pro jednotlivý vlak, ale koordinovaně pro všechny vlaky. Byť se v Česku o takovém řešení uvažuje [Polach, 2012, Pohl, 2014], není dle znalostí autora v Česku zatím v provozu. Simulaci drážního provozu je tedy nutno vytvořit na základě koncepce zabezpečení (resp. řízení) provozu použité nebo plánované v simulovaném provozu.

Celulární (buněčný) automat lze použít na celou řadu simulací, nejenom dopravního proudu. Jeho princip spočívá v přenosu stavu buňky v i-tém kroku na stav sousední buňky v i+1ním kroku. Takto lze zobrazit i jízdni pruh, resp. více jízdnic pruhů, kdy se vozidla v buňkách posouvají v závislosti na obsazenosti buněk před sebou. Do simulace je vložena

náhodnost – vozidlo si před posunem o buňku dál losuje, zda se posune, čímž lze napodobit nelineární chování dopravního proudu, jako je třeba stop and go efekt šířící se proti pohybu kolony.

#### 4.1.4 Dopravní modelování v praxi

Modelování dopravy pro komerční i výzkumné účely je ve světě velmi rozšířené, o čemž svědčí řada produktů, které jsou k modelování určeny. Níže je výběr produktů, které autor považuje za zajímavé nebo důležité:

**Aimsun.** Tvůrce TSS, Barcelona, Španělsko. Jedná se o komerční software pro mikroskopickou simulaci dopravního proudu s využitím zejména pro křižovatky a sítě s více křižovatkami, které se přímo ovlivňují (koordinace). V posledních letech má firma TSS snahu rozšiřovat Aimsun i o strategické modelování, které je na mesoskopické úrovni propojeno s modelem dopravního proudu. TSS také vyvíjí integraci jádra Aimsunu do celoměstských systémů operativního řízení dopravy. Mikroskopický model dopravního proudu je také propojen s mikroskopickým modelováním pohybu pěších od firmy Legion.

**PTV.** Stejnomená firma – tvůrce softwaru sídlí v německém Karlsruhe<sup>36</sup>. PTV nabízí komplexní balík softwarů, z nichž zřejmě nejdůležitější jsou Visum pro zatěžování dopravní sítě, Vissim pro mikroskopickou simulaci dopravního proudu a Viswalk pro mikroskopickou simulaci pěších. Z hlediska názvu této práce je zajímavý modul Optima, který slouží k modelování dopravy v reálném čase – tvorbě prognózy na 60 minut.

**S-Paramics.** Tvůrce SIAS, Edinburg, Spojené království. Produkt, který s dvěma výše uvedenými ztrácí krok, a to zejména po uživatelské stránce. Slouží k mikroskopické simulaci dopravního proudu. Jeho výhodou je zcela otevřená datová struktura. Na trhu existuje také obdobný produkt QuadstoneParamics, vzniklý při rozštěpení původního týmu jednotného Paramicsu.

**SUMO.** Nekomerční software pro mikroskopickou simulaci dopravního proudu vyvíjený Německým centrem letecké a kosmické dopravy (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt). Je v něm implementována celá řada modelů následných vozidel, ovládání softwaru je řešeno příkazovou řádkou a datovými soubory.

**EMME.** Tvůrce INRO, Montreal, Kanada. Dle tvrzení firmy světově nejpoužívanější software pro plánování dopravy, tedy z hlediska dělení použitého v této práci pro strategické modelování.

**Omnitrans.** Tvůrce dat.mobility, Deventer, Nizozemí. Stejně jako EMME slouží pro strategické modelování.

**MATSim.** Open source software vyvíjený Technickými univerzitami v Berlíně a v Curychu ve spolupráci s curyšskou firmou Senozon a open source komunitou sourceforge. Jde o multiagentní strategický model, tzn. výpočet jde na úroveň jednotlivých osob, které se chtějí dostat do práce nebo do školy a hledají vhodný dopravní prostředek, vhodnou trasu a také vhodný čas cesty. Pohyb vozidel po hranách sítě je řešen pomocí modelu kolon. Síť je zatěžována i v čase. Pro uživatele-výzkumníky jde z hlediska licenční politiky o příznivou volbu, pokud jim tedy nevadí programovací řádka a data v textových souborech.

**Villon.** Slovenský mikroskopický simulační nástroj se zaměřením na železnici a logistické terminály vyvíjený původně žilinskou univerzitou a nyní firmou Simcon. Zajímavou referencí

<sup>36</sup> Bádensko-Württemberské Město Karlsruhe je z dopravního hlediska zajímavé i dalšími věcmi, než jen přítomností firmy PTV. Byl zde vybudován první moderní systém train-tram (vlakotramvaj) – využívání univerzálních vozidel schopných provozu jak po tramvajové, tak železniční trati.

je model tzv. bratislavského nosného systému městské železniční dopravy (společný podzemní diametr pro dálkový i městskou železnici).

## 4.2 Výpočty dle technických podmínek

Navržené prvky silniční infrastruktury, tzn. mezikřižovatkové úseky a křižovatky (neboli hrany a uzly) jsou hodnoceny zaříděním do úrovně kvality dopravy A až F. Úrovně A až E znamenají, že prvek vyhoví co se týče kapacity, tzn. že dokáže pojmout větší počet vozidel než počet, který je (bude) předpokládanou zátěží. Úroveň F pak znamená, že intenzita (dopravní poptávka) je větší než kapacita, tzn. že část vozidel nebude moct vůbec projet. První krok posouzení je tedy určení, zda kapacitně vyhoví, nebo nevyhoví. Pokud vyhoví, nastává čas pro druhý krok posouzení a to sice posouzení kvality. Tou mohou být zjednodušeně dva základní ukazatele:

- doba zdržení [s] – zejména křižovatky;
- počet vozidel, tzn. hustota nebo stupeň vytížení [voz/km nebo %] – zejména mezikřižovatkové úseky a také mimoúrovňové křižovatky.

V České republice jsou pro posouzení křižovatek a mezikřižovatkových úseků relevantní následující Technické podmínky Ministerstva dopravy.

TP 189 <sup>37</sup>	Stanovení intenzity dopravy na pozemních komunikacích	vydáno 2012
TP 225 <sup>38</sup>	Prognóza intenzit automobilové dopravy	vydáno 2012
TP 188	Posouzení kapacity neřízených úrovnňových křižovatek	vydáno 2008
TP 234	Posouzení kapacity okružních křižovatek	vydáno 2011
TP 235	Posuzování kapacity světelně řízených křižovatek	vydáno 2011
TP 236	Posuzování kapacity mimoúrovňových křižovatek	vydáno 2011

Samotný postup obnáší nejdříve určení intenzity dopravy dle TP 189, poté přepočítání na návrhové (tzn. budoucí) intenzity dle TP 225 a pak posouzení dle odpovídajícího typu křižovatky, tzn. dle TP 188, 234, 235 a 236. TP 235 částečně nahradilo kapitoly o posuzování kapacity světelně řízených křižovatek dosavadního TP 81 Navrhování SSZ pro řízení silničního provozu z roku 2006, které ale platí pro ostatní dopravně-inženýrské aspekty navrhování světelně řízených křižovatek. Analogická situace je u TP 234, které částečně nahradily TP 135 Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích.

### 4.2.1 TP 189 – stanovení intenzity dopravy

Základním předpokladem posuzování kapacity a kvality je znalost dopravního zatížení. Intenzita se zjišťuje dopravním průzkumem, a to buď prováděným účelově pro dané posouzení, nebo prováděným systematicky. Mezi ty druhé patří Celostátní sčítání dopravy, které se provádí v pětiletém cyklu, zatím poslední proběhlo v roce 2010 a týkalo se silnic 2. tříd a vyšších a také vybraných komunikacích nižších tříd. Celostátní sčítání dopravy je profilové, tzn. pro posouzení křižovatek je nedostatečné, neboť lze určit zatížení vjezdů, nikoli však zatížení jednotlivých křižovatkových pohybů, tzn. např. počet vozidel odbočujících vlevo.

Zjišťovanou hodnotou je hodinová intenzita – pro extravilán padesátirázová a pro intravilán špičková. Při seřazení hodinových intenzit změřených za celý rok (1. leden 0:00 až 1:00,

<sup>37</sup> Druhé vydání

<sup>38</sup> Druhé vydání

1:00 až 2:00, ..., 31. prosinec ... 23:00 až 24:00) od nejvyšší je ta padesátá označena za padesátirázovou hodinovou intenzitu. Pro Celostátní sčítání dopravy, které se na většině profilů provádí několikahodinovým ručním zápisem, jsou z dlouhodobějších sledování určeny přepočtové koeficienty na určení padesátirázové i špičkové hodinové intenzity. Při účelově prováděném dopravním průzkumu se za padesátirázovou či špičkovou hodinovou intenzitu považuje nejvyšší naměřená hodnota. Dle autorovy praxe to znamená dle znalosti místních poměrů určit čas špičky nebo provést orientační průzkum pro určení špičky; poté se v určený čas provede dvouhodinový podrobný dopravní průzkum a čtyři po sobě jdoucí patnáctiminutovky s nejvyšší intenzitou se prohlásí za padesátirázovou nebo špičkovou intenzitu.

TP 189 obsahuje denní, týdenní a roční průběhy intenzit, podle nichž lze např. měření provedené v nějakém měsíci převést na roční průměr.

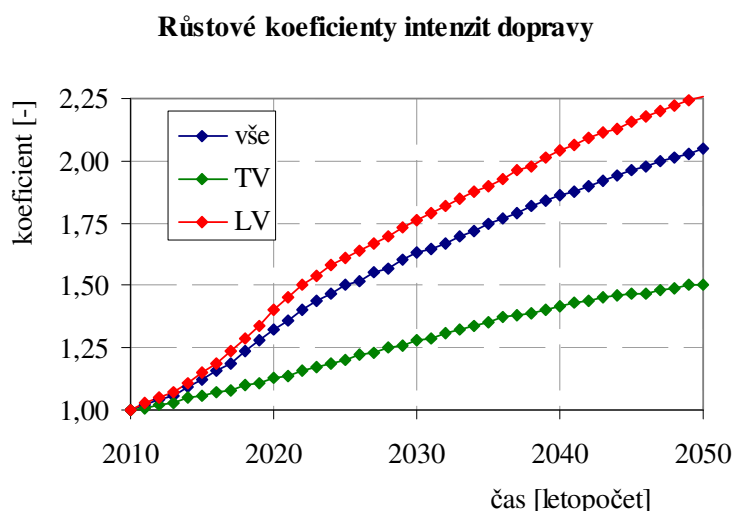
#### 4.2.2 TP 225 – výhledové intenzity dopravy – růstové koeficienty

Silniční stavby se pochopitelně navrhují a staví pro delší časový úsek než jen rok uvedení do provozu, příp. rok, kdy je stavba projektována nebo schvalována. Životnost dopravních staveb je v desítkách let, případně i déle a proto vyvstává potřeba predikce dopravní zátěže na dlouhou dobu dopředu.

TP 225, 2. vydání, je určena pro stanovení výhledového dopravního zatížení metodou jednotného součinitele růstu, což znamená, že pro jednotlivé kategorie komunikací a vozidel a jednotlivé roky jsou určeny koeficienty předpokládaného nárůstu oproti výchozímu roku.

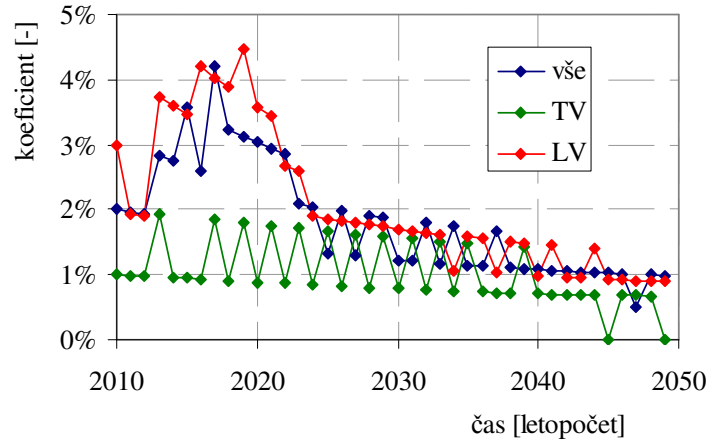
Výhledové zatížení se dle požadavků ČSN 73 6101 určuje pro dvacátý rok po uvedení komunikace do provozu; jedná-li se však o otázku zvýšení počtu jízdních pruhů, pak je třeba zatížení určit i pro třicátý rok po uvedení do provozu.

Metoda jednotného součinitele růstu není jediná možnost, jak prognózovat výhledovou dopravní zátěž. Její nevýhodou je totiž nezahrnutí lokálních změn na straně přepravní poptávky (nové obytné i průmyslové zóny) i dopravní nabídky (výstavba, přestavba či uzavření komunikací). Tyto změny je možno zohlednit při použití dopravních modelů.



Obr. 4-9. Růstové koeficienty pro dálnice dle TP 225, 2. vydání. Lehká vozidla (LV), těžká vozidla (TV) a všechna vozidla (vše).

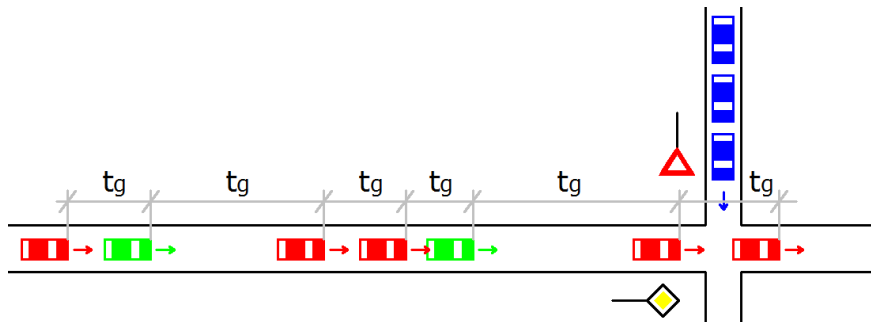
**Predikovaný meziroční nárůst intenzit dopravy**



*Obr. 4-10. Meziroční nárůst vypočítaný podle růstových koeficientů pro dálnice dle TP 225, 2. vydání. Lehká vozidla (LV), těžká vozidla (TV) a všechna vozidla (vše). Zajímavý je pokles růstu intenzit lehkých vozidel po roce 2025. Neplynulý průběh je pravděpodobně zapříčiněn zaokrouhlenou hodnotou koeficientů uvedených v TP 225.*

#### 4.2.3 TP 188 – posouzení neřízených křižovatek

Posouzení je založeno na teoretickém modelu akceptace časových mezer, převzatého z německého HBS. Vozidlo jedoucí z vedlejší komunikace kříží cestu vozidlu na hlavní komunikaci jen tehdy, pokud má dostatek času – tzn., pokud je k dispozici dostatečná mezera mezi vozidly na hlavní komunikaci označené  $t_{g, CRIT}$ . Požadovaná hodnota minimálního rozestupu  $t_{g, CRIT}$  se zjišťuje pozorováním (měřením) ve skutečném provozu.



*Obr. 4-11. Neřízená křižovatka. Modrá vozidla z vedlejší komunikace (v podřazeném proudu) dávají přednost. Před červenými vozidly není dostatečně dlouhá mezera  $t_g$ , naopak před zelenými vozidly je mezera  $t_g$  dostatečná, tzn. větší než  $t_{g, CRIT}$ .*

Pak již jen "stačí" určit četnost výskytu dostatečné mezery v nadřazeném dopravním proudu. Výskyt této mezery lze popsat Poissonovým rozdělením pravděpodobností<sup>39</sup>.

Standardní křižovatka pochopitelně zahrnuje více kolizních bodů, než idealizovaný příklad na obrázku 4-11 s pouhými dvěma křižovatkovými pohyby. Průměrná neřízená křižovatka, ve které nejsou umístěny žádné zákazy odbočení, umožňuje 12 křižovatkových pohybů (z

<sup>39</sup> "Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti má náhodná veličina, která vyjadřuje počet výskytů jevů v určitém intervalu (času, délky, objemu), když nastávají nezávisle na sobě. pravděpodobnosti." [Wikipedie]

každého ze 4 vjezdů je možné jet do 3 směrů), obdobně styková křižovatka umožňuje 6 křižovatkových pohybů. To dohromady dává 4 stupně podřazenosti, z nichž ten první nedává přednost nikomu a dle TP 188 se nijak neposuzuje<sup>40</sup>. Koncepce výpočtu se ale nemění, do intenzity nadřazeného proudu se započtou všechny nadřazené křižovatkové pohyby. Výpočet komplikuje nutnost zahrnout pravděpodobnost (ne)vzdutí nadřazených proudů, tzn. stav, kdy vozidla nepřijíždějí v náhodném intervalu, ale čekají v krátké koloně, a společné vjezdy pro více křižovatkových pohybů, tzn. případy, kde se navzájem ovlivňují vozidla jedoucí v různých směrech a tím pádem dávající přednost jinak zatíženým křižovatkovým pohybům.

Výpočet doby zdržení pro neřízené křižovatky použitý v TP 188, jak je v nich uvedeno, vychází z rovnic Kimber/Hollis odvozených z teorie front, přičemž závisí na kapacitě a rezervě kapacity (tedy odečtením intenzity od kapacity). Je možné stanovit také délku fronty<sup>41</sup>, a to zejména pro účely ověření délky odbočovacích pruhů.

#### 4.2.4 TP 234 – posouzení okružních křižovatek

Princip výpočtu je obdobný jako u křižovatky neřízené, tedy pravděpodobnost, že v nadřazeném jízdním proudu (tzn. na okružním pásu) se vyskytne mezera dostatečná pro zařazení vozidla z vjezdu do okružní křižovatky. Výpočet, opět převzatý z HBS, je navíc upraven i pro spirálové<sup>42</sup> okružní křižovatky.

Výpočet střední doby zdržení je rovněž totožný s postupem u neřízené křižovatky a nejinak tomu je u délky fronty.

##### 4.2.4.1 TP 135 – posouzení okružních křižovatek "postaru"

Technické podmínky 135 "Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích" vydané v roce 2000 se od aktuální metodiky odlišují výpočtem kapacity a její rezervy. Výpočet nebyl založen na pravděpodobnosti výskytu dostatečné mezery v nadřazeném dopravním proudu, ale na porovnání součtu intenzit vjezdu a okružního pásu a empiricky stanovené kapacity 1500 voz/hod.

Střední doba zdržení (ozn. střední čekací doba) se určovala podle rovnic KIMBER/HOLIS při znalosti kapacity a rezervy kapacity, tzn. stejně jako nyní. Délka čekající fronty se vypočetla prostým přenásobením doby zdržení, počtu vozidel (intenzity) a délky vozidla.

#### 4.2.5 Světelně řízené křižovatky (TP 235)

Teoretickým podkladem pro výpočet kapacity světelně řízené křižovatky je Websterova metoda saturovaného toku. Zjednodušeně se dá říct, že podíl kapacity vjezdu do světelně řízené křižovatky na kapacitě neomezeného jízdního pruhu (saturovaném toku) je roven podílu doby zelené na celkové době cyklu. Nejvýraznějším specifikem je podmíněně kolizní<sup>43</sup> odbočení vlevo, které v sobě zahrnuje mj. analogii k neřízené křižovatce.

<sup>40</sup> Pokud není veden společným pruhem s křižovatkovým pohybem s nižším stupněm podřazenosti, např. s odbočením vlevo (chybějící odbočovací pruh vlevo).

<sup>41</sup> Stanovuje se 95% kvantil délky fronty, tzn., že v 95 % času je kolona kratší než vypočtená hodnota.

<sup>42</sup> Spirálová křižovatka je taková, u které se vozidla již na vjezdu do křižovatky zařazují do řadicích pruhů dle výjezdu, kterým budou z křižovatky pokračovat.

<sup>43</sup> Přestože vozidlo vjíždí na signál "volno", musí dávat přednost jiným vozidlům (v tomto případě zejména protijedoucím)



Střední doba zdržení závisí na délce cyklu, délce efektivní zelené<sup>44</sup>, kapacitě vjezdu a intenzitě. Délka fronty, která je rozhodující pro návrh délky řadících pruhů<sup>45</sup>, závisí na délce cyklu, délce efektivní zelené, intenzitě a počtu řadících pruhů.

#### 4.2.5.1 TP 81 – posuzování světelně řízených křižovatek "postaru"

Technické podmínky 81 "Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu" definovaly stejnou koncepci výpočtu, jako současné TP 235, tedy metodu saturovaného toku, bylo ale možné postupovat také metodou spotřeby času. Kromě koeficientů kalibrujících výpočet se odlišovaly především postupem pro výpočet kapacity levého podminěně kolizního odbočení. Posouzení na dobu zdržení se neprovádělo, stejně jako se nezatřídilo do úrovně kvality dopravy. Koncepce výpočtu byla směřována k nalezení optimálního signálního programu pro danou geometrii křižovatky a dané dopravní zatížení.

#### 4.2.5.2 ČSN 73 6102 – posuzování světelně řízených křižovatek "postaru"

Stručný popis posouzení kapacity poskytovala také příloha A ČSN 73 6102 z roku 2007. Koncepčně se jedná o stejný posudek jako dle TP 81. Navíc ale obsahovala posouzení kvality dopravy podle střední dopravy zdržení dle Webstera. Na rozdíl od dnešní úpravy se ale výrazně lišila hranice mezi stupni E a F. Nyní je hranice daná (ne)překročením kapacity, tzn. že stupně E je dosaženo, pokud je intenzita menší než kapacita, a naopak při intenzitě větší než je kapacita nastává stupeň F. Zároveň se pro stupeň E nepožaduje nepřekročení konkrétní doby zdržení. V tehdejší úpravě byla hranicí právě doba zdržení, a to sice hodnota 100 sekund, jejíž překročení „je většinou řidičů považován za nepřijatelný.“ Pro dosažení stupně E tak nepostačovalo nepřekročit kapacitu, ale bylo nutné též nepřekročit střední dobu zdržení 100 sekund. V roce 2011 byla příloha A změnou Z1 výrazně redukována a byly ponechány pouze útržkovité základní informace aktualizované v souladu s TP 235.

#### 4.2.6 Mimoúrovňové křižovatky (TP 236)

Existuje více typů mimoúrovňových křižovatek (dále jen MÚK), přičemž jejich uspořádání je klíčové pro postup kapacitního posouzení. Prvním uspořádáním jsou MÚK s křížnými body<sup>46</sup>, tzn. s úrovňovou křižovatkou alespoň v jedné úrovni, která může být neřízená, okružní i světelně řízená. Dalším uspořádáním jsou MÚK s průpleťovými úseky<sup>47</sup>, kde nejsou žádné křížné body, tzn. žádné úrovňové křižovatky. Posledním uspořádáním jsou MÚK bez průpleťových úseků<sup>48</sup>, kde nejenom že nejsou křížné body, ale nedochází tam ani k průpletu vozidel, pouze k odpojování a připojování. Uvádí se i uspořádání nekonvenční<sup>49</sup>, které se ale v koncepci kolizních bodů neodlišuje od MÚK bez průpleťových úseků.

<sup>44</sup> Skutečná doba zelené se přepočítává na efektivní délku zelené uvažováním pomalejšího rozjezdu prvních vozidel po přechodu červenožlutá a naopak průjezdu vozidel i po přechodu ze zelené na žlutou. Délka efektivní zelené je oproti délce zeleného signálu delší o 0 až 1 sekundu.

<sup>45</sup> Je zajímavé, že TP 235 uvádí na sousedních deseti řadících hned tři pojmy: řadící pruh, odbočovací pruh a pruh pro odbočení, aniž by bylo patrné, zda jde o tři definičně rozdílné věci, nebo jenom volný popis jedné věci. Zřejmě „odbočovací pruh“ a „pruh pro odbočení“ je věc totožná a jedná se o podmnožinu "řadícího pruhu", který může sloužit jak pro odbočení, tak pro jízdu rovně.

<sup>46</sup> Úrovňové křižovatky v obou úrovních má jednovětřevá MÚK, úrovňovou křižovátku v jedné z úrovní má kosodélná, osmičková a deltovitá.

<sup>47</sup> Srdcovitá, čtyřlístková, trojlístková, dvojlístková s lístky vedle sebe, prstencovitá.

<sup>48</sup> Trubkovitá, sdružená, dvojlístková s vystřídánými lístky.

<sup>49</sup> Rozštěpová, spirálová, turbinová, hvězdicová.



MÚK se dle TP 236 posuzují v místech odpojování, připojování a propletání vozidel. Ačkoli to v TP 236 není explicitně deklarováno, tak se dle TP 236 MÚK neposuzují v místech křížných bodů, tzn. tam, kde je úroňová křižovatka, ať už neřízená, okružní, či řízená světelným signalizačním zařízením. Naopak postup dle TP 236 je vhodné (orientačně) použít na úroňové křižovatky s odpojovacími, připojovacími a průpletovými křížnými body, neboť jiná metodika není pro tento typ úroňových křižovatek k dispozici. Nabízí se tak otázka, proč se TP 236 nejmenej *Posuzování kapacity odpojovacích, připojovacích a průpletových úseků*. Omezujícím problémem je, že TP 236 neřeší komunikace s rychlostí nižší než 80 km/h.

Koncepce posouzení podle TP 236 je založena na tabelovaných hodnotách kapacit pro různá uspořádání odpojovacích, připojovacích<sup>50</sup> a průpletových úseků včetně větví MÚK. Úroveň kvality dopravy se na rozdíl od neřízených, okružních a světelně řízených křižovatek nezahrnuje podle střední doby zdržení, ale podle stupně vytížení, což je podíl intenzity a kapacity.

#### 4.2.6.1 Kapacitní posouzení podle ČSN 73 6102

ČSN 73 6102 z roku 2007 v příloze A nabízí tabelované hodnoty úroňových intenzit, tzn. intenzit odpovídajících jednotlivým úroňům kvality dopravy. Změna Z1 z roku 2011 vypustila většinu přílohy A týkající se posuzování křižovatek a ponechala pouze útržkovité základní informace a hodnoty aktualizované ve shodě s TP 236. Změna Z1 je zapracována v 2. edici ČSN 73 6102 z roku 2012.

#### 4.2.7 Požadovaná úroveň kvality dopravy

ČSN 73 6101 stanovuje požadovanou úroveň kvality dopravy pro různé kategorie komunikací (tab. 4-15). Za povšimnutí stojí i srovnání přepočtových koeficientů pro různé typy křižovatek.

TP	Typ křižovatky	Jízdní kola	Motocykly	Osobní vozidla	Nákladní vozidla, autobusy	Nákladní soupravy, kloubové autobusy
188	Neřízená	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0
234	Okružní	0,5	0,8	1,0	2,0	3,0
235	Světelně řízená	0,5	0,8	1,0	1,7	2,5
236	Mimoúroňová	–	–	–	–	–

Tab. 4-12. Srovnání přepočtových koeficientů pro jednotlivé kategorie vozidel na různých typech křižovatek. V případě mimoúroňové křižovatky se skladba zohledňuje rozdělením tabelovaných hodnot kapacit podle podílu pomalých vozidel.

<sup>50</sup> TP 236 deklarují, že se nezabývají systémem "Ramp metering".

Úrovně kvality dopravy		Doba zdržení [s]		
		Neřízená	Okružní	Světelně řízená
		TP 188	TP 234	TP 235
A	Dob zdržení velmi malá	≤ 10	≤ 10	≤ 20
B	Zdržení ještě bez front	≤ 20	≤ 20	≤ 35
C	Ojedinelé krátké fronty	≤ 30	≤ 30	≤ 50
D	Stabilní stav s vysokými ztrátami	≤ 45	≤ 45	≤ 70
E	Nestabilní stav	> 45	> 45	> 70
F	Překročená kapacita			

Tab. 4-13. Srovnání středních dob zdržení odpovídajících jednotlivý úrovním kvality dopravy pro různé typy křižovatek.

Úrovně kvality dopravy		Stupeň vytížení [-]
		Mimoúrovňová křižovatka
		TP 236
A	Velmi dobrá	≤ 0,30
B	Dobrá	≤ 0,55
C	Uspokojivá	≤ 0,75
D	Dostatečná	≤ 0,90
E	Nestabilní	≤ 1,00
F	Nevyhovující	

Tab. 4-14. Úrovně kvality dopravy a odpovídající stupně vytížení pro mimoúrovňové křižovatky.

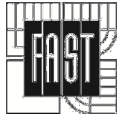
Komunikace	ÚKD	Vlastník <sup>51</sup>	Silniční správní úřad <sup>52</sup>	Délka [km] <sup>53</sup>
Dálnice	C	Stát	Ministerstvo dopravy	751
Rychlostní silnice <sup>54</sup>	C	Stát	Ministerstvo dopravy	442
Silnice I. třídy	C	Stát	Krajský úřad	5 807
Silnice II. třídy	D	Kraj	Úřad obce s rozšířenou působností	14 542
Silnice III. třídy	E	Kraj	Úřad obce s rozšířenou působností	34 172
Místní komunikace	E* **	Obec	Obecní úřad	

<sup>51</sup> §9 odst. 14 Zákona č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích

<sup>52</sup> §40 Zákona č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích

<sup>53</sup> Délka v rámci České republiky v roce 2013 dle ŘSD (2013)

<sup>54</sup> Dle Zákona č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích patří rychlostní silnice mezi silnice I. třídy, vzhledem k velké odlišnosti se ale běžně vyčleňují do samostatné kategorie. Ministerstvo dopravy plánuje kategorii rychlostních silnic zcela zrušit a stávající rychlostní silnice rozdělit mezi dálnice a silnice I. třídy (Skovajsa, 2013). Dle Zákona č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích existuje „silnice pro motorová vozidla“ – takto jsou v praxi označovány rychlostní silnice, ale mohou takto být označené i silnice I. třídy nezařazené mezi rychlostní silnice, např. I/23, I/43 a I/50 v Brně.



Účelová komun.	-	Kdokoli	Obecní úřad	
----------------	---	---------	-------------	--

\* na místních rychlostních komunikacích se mimo špičky požaduje stupeň E

\*\* na křižovatkách se připouští v kratších časových úsecích po dobu max. jedné hodiny st. F

Tab. 4-15. Požadovaná úroveň kvality dopravy

## 4.2.8 Železniční přejezdy

Přejezdy – úroňové křížení pozemní komunikace a dráhy (mimo dráhu tramvajovou, trolejbusovou a vlečkovou) lze zřídit jen v případě malého dopravního významu<sup>55</sup>, který ale není definován<sup>56</sup>. Přejezdy, včetně vlečkových přejezdů, je doporučeno zřizovat jen na silnicích do kategorijského typu S7,5, a to jen na jednokolejných tratích, a to pouze v odůvodněných případech<sup>57</sup>; na místních komunikacích se přejezdy zřizují jen na funkční skupině C, příp. B nižšího dopravního významu, tzn. na komunikacích s funkcí obslužnou, příp. s kombinací funkcí obslužné a dopravní<sup>58</sup>.

Z hlediska dopravního zatížení se posuzuje dopravní moment, který je rozhodující pro způsob zabezpečení přejezdu – pokud dopravní moment nepřesáhne hodnotu 10 000 a zároveň není vícekolejný, rychlost drážních vozidel není vyšší než 60 km/h nebo nedochází k nemožnosti zajistit rozhled, postačuje zabezpečení výstražným křížem. Dopravní moment se vypočte jako součin denní intenzity drážních vozidel (vlaků, posunů a posunů mezi dopravami) a desetinásobku hodinové intenzity silniční dopravy<sup>59</sup>. Kvalita silniční dopravy (např. doba zdržení) se neposuzuje.

## 4.2.9 Mezikřižovatkové úseky v extravilánu (ČSN 73 6101, příloha A)

Posouzení kvality dopravy na silnicích a dálnicích v úsecích mimo křižovátku definuje ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic v příloze A. Zatřídění do úrovně kvality dopravy probíhá podle intenzity, resp. poměru intenzita/kapacita. Pro dvoupruhové silnice jsou tabelovány hodnoty úroňových intenzit s členěním dle třídy stoupání, podílu pomalých vozidel a křivolakosti doplněné přídatkem pro úseky se zákazem předjíždění. Pro čtyřpruhové silnice jsou tabelovány kapacity v závislosti na délce a sklonu stoupání a podílu pomalých vozidel – pro zatřídění do ÚKD jsou stanoveny stupně vytížení, tedy hraniční podíly intenzita/kapacita. Výpočet rychlostních silnic a dálnic je totožný s výpočtem čtyřpruhových silnic – liší se pouze hodnotami tabelovaných kapacit.

<sup>55</sup> § 37, odst. 1 Zákona č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích.

<sup>56</sup> Hranici pro zřízení přejezdu nedefinuje ani Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů č. 104/1997 Sb., kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích, ani Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah a ani závazná ČSN 73 6380 Železniční přejezdy a přechody.

<sup>57</sup> Článek 11.5 ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic, dle Vyhlášky Ministerstva dopravy a spojů č. 104/1997 Sb., kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích, je ČSN 73 6101 doporučena.

<sup>58</sup> Článek 12.5 ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací

<sup>59</sup> ČSN 73 6380 Železniční přejezdy a přechody

## 5 SYSTEMATICKÁ OPTIMALIZACE

Optimalizace je proces pro hledání extrému funkce, která popisuje zkoumaný jev. Je-li popsán vztah mezi parametry systému a užítkem, pak lze hledat takové parametry, při kterých je dosaženo největšího užitku. Záleží na charakteru hledaného užitku, zda se jedná o hledání maxima (např. největší cestovní rychlost) nebo minima (např. nejkratší cestovní doba). Náročnost optimalizace do značné míry závisí na složitosti funkce a množství vstupních parametrů.

### 5.1 Pokusná versus systematická optimalizace

Běžný postup při návrhu dopravní sítě lze označit za **pokusnou optimalizaci**. Projektant na základě svých znalostí, zkušeností a intuice navrhne varianty, které pomocí dostupných prostředků může posoudit a vybrat z nich tu optimální. Například může pro konkrétní místo navrhnout průsečnou křižovatku řízenou světelným signalizačním zařízením nebo okružní křižovatku – obě varianty se mohou ještě dělit např. dle počtu jízdních/řadicích pruhů. Potom s využitím technických předpisů nebo mikroskopické simulace vypočte kapacitu a kvalitu dopravy a řekne, která z variant kapacitně vyhoví a která bude pro řidiče představovat menší zdržení. V lepším případě projektant udělá ještě model dotčené dopravní sítě, na kterém se může projevit dopad řešení na celou síť – např. to, že řidiči místo dlouhého čekání na zelenou raději pojedou jinudy. Je evidentní, že výsledek hodnocení je do značné míry závislý na návrzích konkrétních variant, které projektant provedl. Není-li po hodnocení s výsledkem spokojen, např. proto, že žádná z variant nevyhoví může stávající varianty pozměnit či navrhnout zcela nové a tento postup může opakovat tak dlouho, dokud si řekne, resp. dokud mu někdo neřekne, že již nemá cenu další varianty řešit a že s výsledkem je spokojen.

Alternativním postupem je definice všech reálně možných variant a jejich vyhodnocení, tzn. určení, která z nich je nejlepší. Tento postup je v této práci nazván jako **systematická optimalizace**. V případě uvedeném v předchozím odstavci by to znamenalo vypsání všech uspořádání křižovatek (průsečná neřízená, průsečná řízená, okružní, mimoúrovňová) a tato rozdělit podle dalších ukazatelů – počty jízdních, resp. řadicích pruhů, poloměr okružní křižovatky, délky zelených řízené křižovatky atd. Poté by se spočítaly všechny myslitelné varianty a identifikovala ta nejlepší, tedy optimální. Správně by se všechny varianty měly počítat s dopadem na celou síť.

Využití systematické optimalizace naráží na dva zásadní související problémy. Jednak je třeba pospat všechny varianty, které mohou nastat, a dále je nutné je všechny propočítat. Jako nezbytná se tedy jeví automatizace jak výpočtu optimalizačního kritéria, tak v lepším případě i samotných variant uspořádání silniční sítě. Tyto podmínky nejsou v praxi triviální, naopak mohou provedení systematické optimalizace zcela znemožnit.

### 5.2 Heuristika

V jednoduchých případech lze optimální řešení hledat analyticky. Jednoduchým příkladem je dělba cyklu na dobu zelené dle intenzit – doba zelené se rozdělí ve stejném poměru, v jakém jsou k sobě intenzity (podrobněji kap. 7, vztah 7.3). Použitelnost analytického řešení je ovšem z podstaty omezena a pro složitější, resp. komplexnější úlohy je nutno použít metody numerické. V tom případě existují v zásadě dvě cesty. První je spočítat všechny varianty a pak ukázat na nejlepší. Nevýhoda této cesty se objeví, pokud variant je velmi hodně a není je

reálné spočítat všechny. Druhou možností je vybírat si, které varianty budeme počítat, podle nějakého klíče. Při vhodně zvoleném klíči (algoritmu) nalezneme dobrou variantu, která sice je nejlepší nám známou variantou, ale nemusí být nutně skutečně nejlepší variantou. Takový postup, kdy nevíme, zda naše nejlepší řešení je skutečně nejlepší je všeobecně označován jako heuristický. Nejlepší nalezené řešení se pak označuje jako **pseudooptimální**.

V průběhu věků byla vyvinuta řada optimalizačních algoritmů, z nichž podrobněji je popsán genetický algoritmus, který bude využit pro praktický optimalizační úkol.

## 5.3 Genetický algoritmus

Genetický algoritmus napodobuje evoluci organismů, která pomocí křížení a mutací vedla k zdokonalování organismů. Stejně, jako se z méně dokonalých prvků stali dokonalejší lidé, by se užitím evoluce<sup>60</sup> měla stát např. dokonalejší konfigurace dopravní sítě. Genetický optimalizační algoritmus je postup heuristický.

### 5.3.1 Princip optimalizace

Nechť existuje populace, kdy každý jedinec nese svoji genetickou informaci, tvořenou řetězcem genů. V případě optimalizace dopravní sítě jedinec může představovat variantu a každý gen křížovatkový pohyb. Jednotlivé geny mohou nabývat různých hodnot označených jako alely – např. křížovatkový pohyb může nabývat hodnot "povoleno" nebo "zakázáno".

Jedinec	Chromozom										Fitness
1. jedinec	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	5
2. jedinec	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	3
3. jedinec	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	6
4. jedinec	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	4
5. jedinec	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	4

Tab. 5-1. Příklad nulté generace. Každý jedinec má chromozom tvořený zde 10 geny, které zde mají dvě alely (0 a 1). Fitness je zde reprezentováno počtem alel "1".

Nultá generace je vygenerována náhodně. Další generace vznikají kombinací reprodukce, křížení a mutace, a to tak dlouho, dokud se již jedinci dále nezdokonalují. Reprodukce v této souvislosti znamená přenos genetické informace na další generaci tak, jak je (tedy beze změn). Důležitým aspektem je, že pro další generaci se vybírají ti nejlepší jedinci, tzn. jedinci s nejvyšším fitness (selekce).

Optimalizační kritérium, tzn. kvalita jedince je označována jako **fitness** [Teda, 2005] nebo užitková funkce [Šíma, 1996]. Je pochopitelně nutné, aby mohla být spočítána z informací uložených v chromozomu. Slouží pro výběr rodičů i pro hodnocení, že algoritmus lze ukončit (nejlepší fitness se již dále nezlepšuje).

Výběr jedinců pro reprodukci založený na jejich fitness se nazývá **selekce** a je odvozen z Darwinovy teorie přirozené selekce – silnější, obratnější, šikovnější a všeobecně lepší samec

<sup>60</sup> Evoluce je samovolný dlouhodobý proces rozvíjející a diverzifikující život. Autorem první evoluční teorie byl Jean-Baptiste Lamarck (1744 Bazentin-le-Petit, Francie – 1829 Paříž); dodnes respektovanou teorii zahrnující i přirozený výběr definoval Charles Darwin (1809 Shrewsbury, Anglie – 1882 Kent, Anglie). Základy genetiky (dědičnosti) položil Johann Gregor Mendel (1822 Hynčice – 1884 Brno) v Brně, tzn. ve stejném městě, v jakém vznikla tato disertační práce. Zdroj: Wikipedie

má větší šanci získat a oplodnit samičku a vytvořit své potomstvo, už proto, že není předtím např. uloven jiným živočichem. Selektce během genetického algoritmu je realizována náhodným výběrem, který zohledňuje fitness jedinců – šance na výběr konkrétního jedince jako rodiče je úměrná jeho fitness.

**Křížení** znamená výměnu náhodně vybrané části genetické informace mezi dvojicí rodičů Šíma [1996] rozlišuje křížení jednobodové, kdy výměna genů probíhá od náhodně vybraného bodu; křížení vícebodové, kdy náhodně vybraných bodů je více, a křížení uniformní, kdy se u každé genu (náhodně) rozlišuje zvlášť, zda bude podroben křížení, nebo ne.

Jedinec	Chromozom										Fitness
otec	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	5
matka	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	3
náhodné číslo	0,38	0,59	<b>0,96</b>	0,45	0,15	0,28	0,73	0,62	0,42	0,35	
1. potomek	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	4
2. potomek	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	4

Tab. 5-2. Příklad jednobodového křížení se zvolenou 20% pravděpodobností (náhodné číslo větší než 0,8).

Jedinec	Chromozom										Fitness
otec	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	5
matka	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	3
náhodné číslo	0,38	<b>0,59</b>	<b>0,96</b>	<b>0,45</b>	0,15	0,28	<b>0,73</b>	<b>0,62</b>	<b>0,42</b>	0,35	
1. potomek	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	6
2. potomek	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2

Tab. 5-3. Příklad uniformního křížení se zvolenou 60% pravděpodobností (náhodné číslo větší než 0,4).

**Mutace** je náhodná změna některého z genů. Tím se do chromozomu zanesou zcela nové informace, která může znamenat lepší fitness. Odstraňuje se tím také zvyšující se jednotvárnost populace. K mutaci dochází s řádově menší pravděpodobností než ke křížení [Šíma, 1996].

Jedinec	Chromozom										Fitness
potomek	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	5
náhodné číslo	0,38	0,59	<b>0,96</b>	0,45	0,15	0,28	0,73	0,62	0,42	0,35	
zmutovaný potomek	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	6

Tab. 5-4. Příklad mutace se zvolenou 5% pravděpodobností (náhodné číslo větší než 0,95).

Pro urychlení optimalizace Teda [2005] doporučuje upravit náhodnost křížení a mutace dle heuristické funkce sledující zisk lepšího řešení přímo při samotném křížení/mutaci.



## 6 HLEDÁNÍ VHODNÉ ÚLOHY PRO OPTIMALIZACI

Z nekonečné řady parametrů, které lze na různých dopravních sítích optimalizovat, je nutné pro další práci vybrat takové, které budou vhodné pro ukázkou systematické optimalizaci. Je tedy nutné definovat vhodnou optimalizační úlohu.

Při výběru, resp. definici optimalizační úlohy je třeba respektovat následující kritéria:

- objektivní
  - schopnost automatizovat návrh a výpočet variant uspořádání optimalizované dopravní sítě
  - velký dopad opatření na dopravní síť jako celek a z toho vyplývající komplexnost řešení
- subjektivní
  - zaměření ústavu autora této práce a s tím spojený praktický význam, tzn. navrhování pozemních komunikací také z hlediska plynulosti provozu
  - zaměření úloh řešené autorem této práce v minulosti, tzn. diplomová práce s názvem Simulace dopravní sítě v oblasti Veveří a cílem ověřit přínosy zjednosměrnění souběžných ulic, komerční zakázky zaměřené na dopravně-inženýrské posouzení a výzkumné projekty orientované na modelování dopravy.

Po dlouhých úvahách o rozličných tématech se jako nejlepším ukázalo levé odbočení na světelně řízených křižovatkách, a to z následujících důvodů:

- zákaz levého odbočení je docela časté opatření ke zvýšení plynulosti dopravy;
- dopad na uživatele dopravní sítě není intuitivně jednoznačný – části uživatelů (odbočující dosud vlevo) může zákaz levého odbočení přinést komplikace, naopak jiné části uživatelů (dosud neodbočující vlevo) může přinést zrychlení;
- předpoklad výrazného dopadu na celou síť – vynuceně se mění trasy některých cest a zásadně se mění odpor sítě v místech zakázaného levého odbočení – tam po zákazu levého odbočení zbývá více kapacity pro ostatní směry, což může vést ke změně zatížení významné části sítě (viz kap. 2.1.2);
- výpočet kapacity jednotlivé křižovatky je známý;
- výpočet zatížení dopravní sítě se zohledněním odporu sítě je známý;
- zrušení levého odbočení umožní zrušit odbočovací pruh vlevo a jeho prostor využít pro jiné řadící pruhy – předpoklad automatizovaného návrhu uspořádání křižovatky dle univerzální šablony;
- zrušení levého odbočení umožní při světelném řízení křižovatky zrušit fázi pro odbočení vlevo o její podíl na době cyklu přerozdělit mezi ostatní směry – předpoklad automatizovaného návrhu signálního plánu dle univerzální šablony;

Z výše uvedených bodů je zřejmé, že tuto komplexní úlohu lze automatizovat, což je rovněž zásadní okolnost umožňující její řešení systematickou optimalizací.

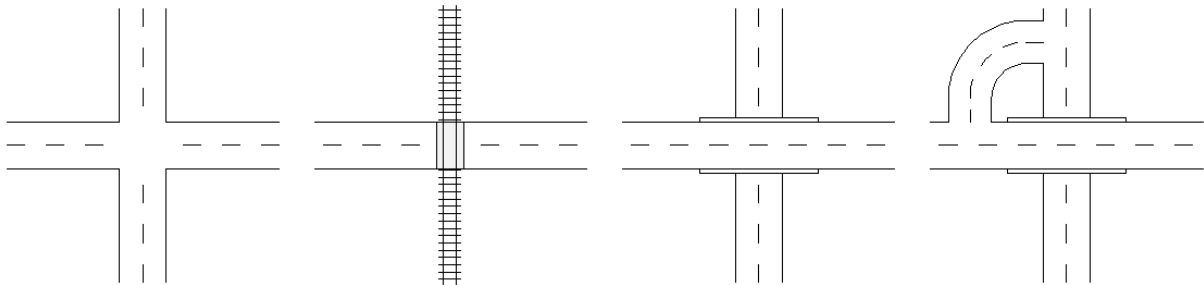
Před definicí úlohy levých odbočení se jeví jako vhodné se podrobněji zaměřit na křižovatky pozemních komunikací, kterých se tato úloha bude týkat.

### 6.1 Křižovatky pozemních komunikací

**Křižovatky** jsou uzly sítě pozemních komunikací – spojují jednotlivé hrany a umožňují přechod z jedné hrany na druhou. Z názvu i z podstaty vyplývá, že se v křižovatce kříží trajek-



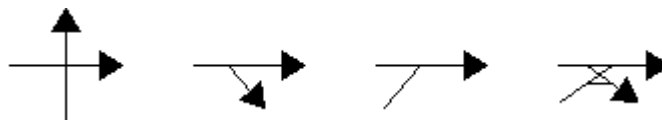
torie vozidel, což má vliv na bezpečnost i na plynulost dopravy. V případě **křížení** se hrany (komunikace) půdorysně stýkají, ale není možné mezi nimi přejíždět. Křížení i křižovatka mohou být v jedné či více úrovních (úrovňová vs. mimoúrovňová křižovatka, resp. křížení).



Obr. 6-1 Zleva úrovňová křižovatka pozemních komunikací, úrovňové křížení pozemní komunikace a dráhy, mimoúrovňové křížení dvou pozemních komunikací a mimoúrovňová křižovatka dvou pozemních komunikací.

Zákon o pozemních komunikacích<sup>61</sup> křižovatku definuje nepřímou tím, že *Pozemní komunikace lze navzájem připojovat zřizováním křižovatek nebo připojovat na ně sousední nemovitosti zřízením sjezdů nebo nájezdů. Přímé připojení sousední nemovitosti na pozemní komunikaci není účelovou komunikací.* Křižovatka tedy připojuje pozemní komunikace, ale pozor! Podle Zákona o provozu na pozemních komunikacích<sup>62</sup> *křižovatka je místo, v němž se pozemní komunikace protínají nebo spojují; za křižovatkou se nepovažuje vyústění polní nebo lesní cesty nebo jiné účelové pozemní komunikace na jinou pozemní komunikaci.* Tento zákon tedy vylučuje z křižovatek ta místa, kde se připojuje účelová komunikace. Názvoslovná ČSN 73 6100<sup>63</sup> nabízí kompromisní výklad, neboť křižovatka je podle ní *místo, v němž se pozemní komunikace v půdorysném průmětu protínají nebo stýkají a alespoň dvě z nich jsou vzájemně propojeny. Křižovatkou není úrovňové připojení účelové komunikace, která není veřejně přístupná, sousední nemovitosti, zastávky osobní linkové dopravy, čerpací stanice pohonných hmot, motelu, motorestu, parkoviště, odpočívky apod.* I s ohledem na jistý legislativní chaos nechť je pro tuto práci křižovatkou propojení dvou a více pozemních komunikací jakékoli kategorie včetně např. připojení velkých parkovišť apod. Tzn. místo, kde se protínají dopravní proudy bez ohledu na administrativní určení komunikací.

Vozidla, jejichž trajektorie se protínají, nemohou pochopitelně jet zároveň - tím dochází ke ztrátě kapacity i plynulosti dopravního proudu. Z hlediska dopravní sítě jako celku tak můžeme hovořit o odporu, kterým uzly na dopravní proud působí – přitom odpor může být v rámci jednoho uzlu významně odlišný pro spojení různých hran, tzn. zdržení.



Obr. 6-2 Kolizní body: Křížový, oddělovací, připojovací a průpletový.

Řešením kapacitního problému může být mimoúrovňové křížení některých dopravních proudů, tedy použití některé z dále uvedených mimoúrovňových křižovatek (MÚK), pokud je

<sup>61</sup> §8 odst. 1 Zákona č. 13/1997 Sb. o pozemních komunikacích

<sup>62</sup> §2 písmeno w) Zákona č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů

<sup>63</sup> Čl. 6.3 ČSN 73 6100-1 Názvosloví pozemních komunikací – Část 1: Základní názvosloví

to z ekonomických, prostorových a urbanistických důvodů možné. Mimoúrovňové křižovatky lze rozdělit podle podílu dopravních proudů, které se kříží mimoúrovňově, resp. podle stupně eliminace kolizních bodů – nejjednodušší MÚK mají v obou úrovních úrovněnou křižovatku, která zajišťuje propojení obou úrovní. Vyšší stupeň MÚK vylučuje v jedné z úrovní křížné body, což je požadavek při návrhu dálnice a rychlostní silnice. Další stupeň MÚK vylučuje křížné body na obou úrovních a nejvyšší stupeň vylučuje i průpletové kolizní body. Z tabulky 6-4 je patrné uspořádání MÚK dle stupňů eliminace kolizních bodů.

Křižovatka může být:

- úrovněová
  - průsečná, styková a (a v dnešní době nedoporučované vidlicová a hvězdicová)<sup>64</sup>
  - okružní

Všechny typy úrovněových křižovatek mohou být řízené, či neřízené. Provoz na neřízených křižovatkách se řídí obecnou a místní úpravou.

Obecnou úpravou je:

- Přednost zprava (povinnost dát přednost vozidlům přijíždějícím zprava)
- Přednost protijedoucích vozidel (povinnost dát při odbočování vlevo přednost vozidlům, která jedou v protisměru)
- Speciální ustanovení pro obytné a pěší zóny a místa ležící mimo pozemní komunikaci (povinnost dát přednost při výjezdu z obytné zóny, pěší zóny, účelové komunikace, parkoviště, odpočívky apod.)

Místní úpravou je dopravní značení upravující přednost, tzn. značení hlavní a vedlejší komunikace.

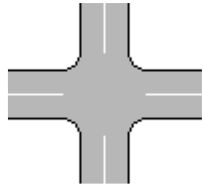
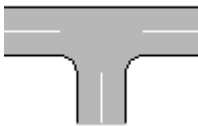


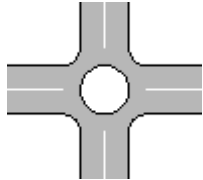



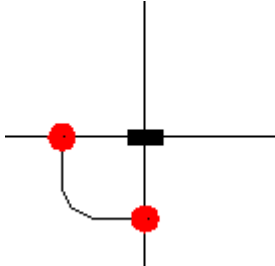
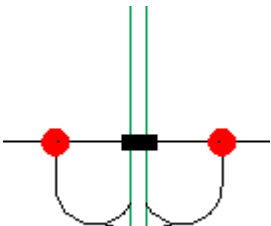
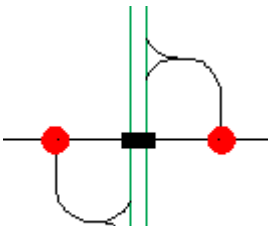
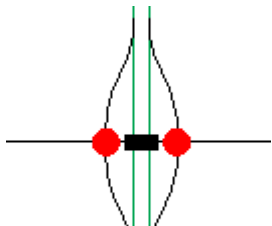
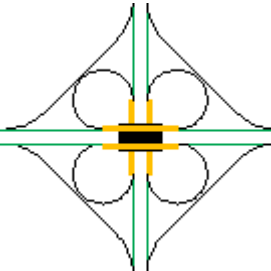
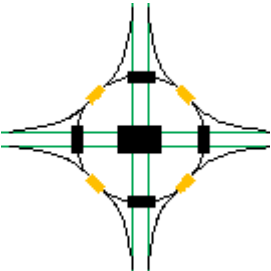
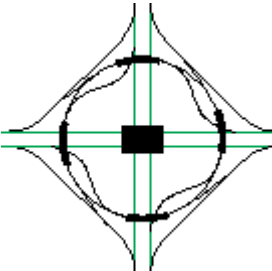
Provoz na řízených křižovatkách je řízen regulovčikem<sup>65</sup> nebo světelným signalizačním zařízením (světelně řízené křižovatky).

Typ křižovatky	Orientační hodinová kapacita [voz/h]
průsečná nebo styková – neřízená	1500 ÷ 2000
průsečná nebo styková – řízená SSZ	2000 ÷ 6400
miniokružní	1500 ÷ 2000
okružní jednopruhová	2000 ÷ 2700
okružní vícepruhová (včetně spirálové)	2500 ÷ 3500

Tab. 6-3. Orientační kapacity různých typů křižovatek dle TP 234, resp. 235.

<sup>64</sup> Uvádí se rovněž odsazená křižovatka, což jsou dvě styková v těsné blízkosti

<sup>65</sup> Policista, Vojenský policista, příslušník Vojenské pořádkové služby, strážník městské policie nebo příslušník Hasičského záchranného sboru, viz §75 Zákona č. 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů

<b>Křižovatky</b>				
<b>úrovňové</b>	 průsečná	 styková	 vidlicová	 hvězdicová
	 okružní (3, 4 a 5ramenná)	 okružní (3, 4 a 5ramenná)	 okružní (3, 4 a 5ramenná)	 okružní (3, 4 a 5ramenná)
<b>mimoúrovňové</b> s křížnými body v obou úrovních	 jednovětвовá			
<b>mimoúrovňové</b> s křížnými body v jedné z úrovní	 deltovitá	 osmičková	 kosodélná	
<b>mimoúrovňové</b> s průpleťovými úseky bez průpleťových úseků	 čtyřlístková	 s mezilehlým okružním pásem	 spirálová	

Tab. 6-4. Křižovatky pozemních komunikací..

### 6.1.1 Řízení silniční dopravy

Provoz na dopravní síti lze řídit jak v dlouhodobém měřítku pomocí stavebních úprav, dopravního značení apod., tak v okamžitém měřítku, a to pomocí dopravní telematiky. Nejrozšířenějším způsobem řízení dopravy na pozemních komunikacích je světelné řízení křižovatky, tedy lidově semaforey. Ty se dají použít i na další úlohy, jako řízení obousměrné dopravy po jednopruhovém komunikaci nebo jako tzv. světelná závora, což je prostředek pro přerušení dopravního proudu.

Mezi další možnosti patří liniové řízení dopravy, kdy se po délce komunikace mění dovolená rychlost se snahou o ustálení dopravního proudu a tím zvýšení plynulosti a případně i kapacity komunikace. V Česku je toto opatření realizováno na Pražském okruhu (silnice R1). Souvisejícím opatřením může být otevírání odstavných pruhů – při vysokých intenzitách se proměnným dopravním značením sníží rychlost a umožní jízdu vozidel i v odstavném pruhu, čímž se například dvoupruhový dálniční pás stane třípruhovým. V Česku takové úseky nejsou, používány jsou ale v Německu, např. na A4 u Kolína nad Rýnem, kde kvůli husté zástavbě je velmi problematické projednat stavební rozšíření dálnice. Na dálnicích okolo Kolína se také rutinně systém nazývaný Ramp Metering, které slouží k regulaci vjezdu na dálnici nebo obdobnou komunikaci – cílem systému je dle popisu zakladatele tamních telematických systémů Rainera Lehmana nepustit na dálnici více vozidel, než je její kapacita a tím zajistit na dálnici plynulý průjezd – celková cestovní doba se tak má snížit, přestože řidič může několik minut strávit u vjezdu na dálnici. A aby telematiky nebylo na kolínských dálnicích málo, zkušebně tam instalovali i informační tabuli, která má řidiče informovat, zda je aktuálně lepší Kolín objet z té, nebo z té druhé strany. Přínos je ale malý, protože obě konkrétní trasy nejsou stejně dlouhé a běžně nenastává situace, kdyby se vyplatilo řidiče směřovat druhou stranou. V Česku s informováním řidičů o průjezdnosti tras experimentuje Praha a Zlín – toto aktuální téma by si ale zasloužilo samostatnou práci. Alternativou těchto proměnných značek je online předávání informací do navigací ve vozidlech, které leckde již funguje rutinně.

Kolín nad Rýnem z mnoha podobně vybavených zmiňuji, protože jsem při krátké stáži v organizaci BAST<sup>66</sup> měl možnost zhlédnout fungování tohoto systému na dálničním okruhu okolo Kolína nad Rýnem za doprovodu Rainera Lehmana, který patří mezi duchovní otce tamní telematiky a poskytl mi výše uvedené informace.

**Světelně řízená křižovatka** usměrňuje pohyb vozidel tak, že řidiči dává pokyny k jízdě, nebo k zastavení. Střídavě umožňuje jízdu v jednotlivých směrech tak, aby mezi nimi nedošlo ke kolizi. Na neřízené křižovatce potřebuje řidič z vedlejší komunikace, aby mohl jet, mezeru mezi vozidly jedoucími po hlavní komunikaci. Pokud je tato mezera menší než akceptovaná řidičem z vedlejší a zároveň je tato mezera delší než minimální mezera mezi vozidly, dochází ke stavu, kdy ani v jednom směru nejede žádné vozidlo a dochází tak k plýtvání kapacity. Při řízení křižovatky jsou vozidla dávkována tak, že jedou v minimálním rozestupu za sebou (saturovaný tok) a křižovatka tak dosahuje vyšší kapacity, pokud tedy není nárůst kapacity ztracen při přechodu mezi zelenou v jednotlivých směrech [Medelská, 1991].

Světelně řízená křižovatka rovněž umožňuje koordinaci (tzv. zelenou vlnu), tzn. takové sladění sousedících křižovatek, kdy lze více křižovatek projet bez nutnosti zastavení. Koordinace tahu je ale podmíněna pravidelným rozestupem mezi křižovatkami, v opačném případě

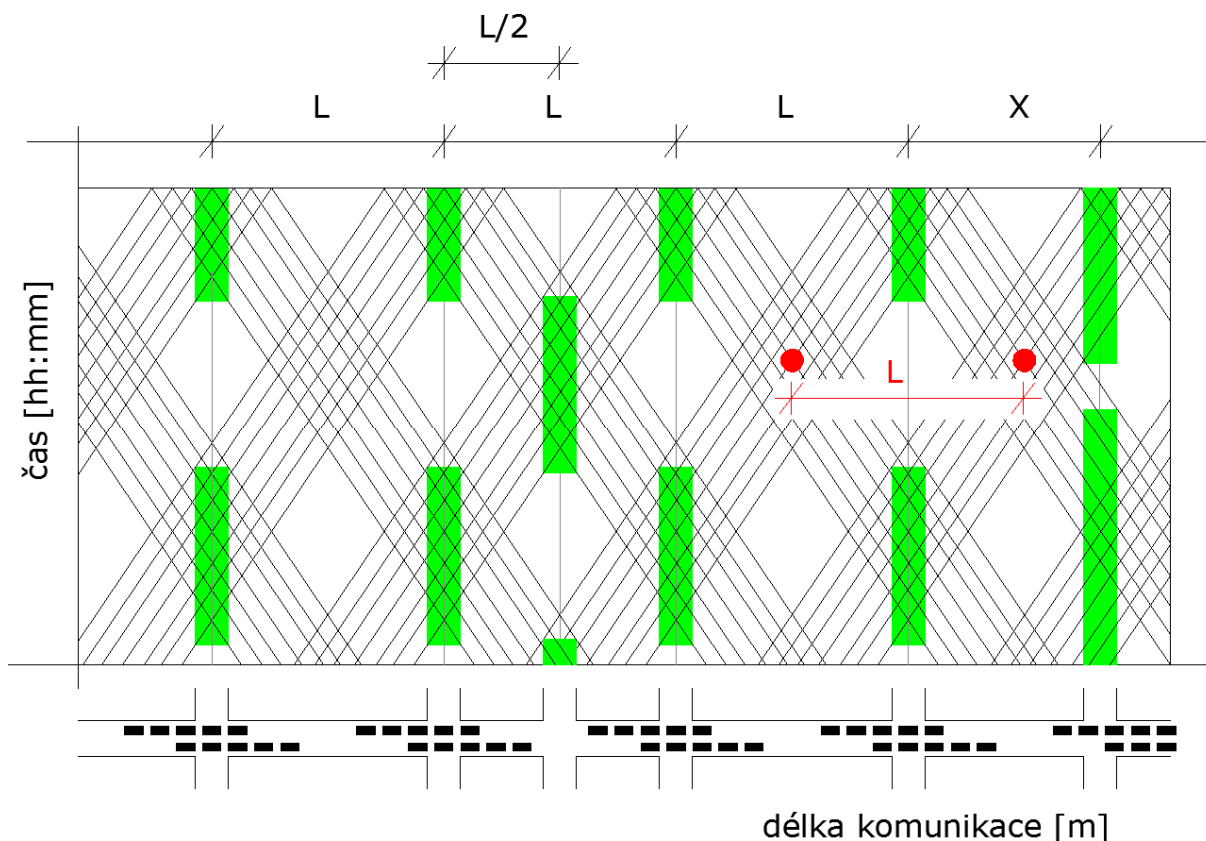
<sup>66</sup> Bundes Anstalt für Straßenwesen, spolkový/federální výzkumný ústav pro pozemní komunikace, sídlí ve městě Bergisch Gladbach v těsné blízkosti Kolína nad Rýnem.

Ize koordinaci realizovat pouze v jednom směru (viz obr. 6-6). Ve městech, která mají pravidelnou pravoúhlovou uliční síť, pak lze realizovat i plošnou koordinaci.

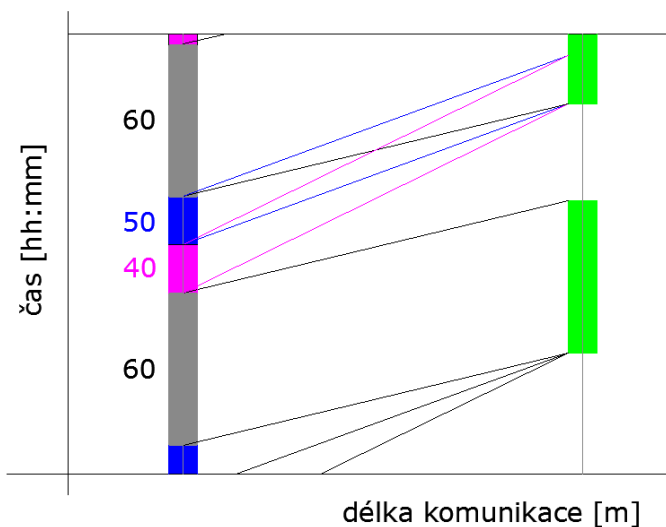


Obr. 6-5. V horní linii nepravidelné rozestupy dopravního proudu, kdy vozidla mívají větší rozestup než minimální (bezpečný), ale zároveň menší než potřebný pro vjezd vozidla z vedlejší (označen zeleně). Ve spodní linii dopravní proud usměrněný čekáním na návěst volno – zeleně vyznačena doba, kdy je možné jezdit z vedlejší.

Plynulost dopravy lze dále zvýšit využitím signálního trychtýře – signalizací doporučené rychlosti rychlostními návěstidly (viz obr. 6-7). Toto opatření bylo např. v Brně hojně rozšířené, dle paměti autora bylo hromadně vypnuto v souvislosti se zavedením rychlostního limitu v obci 50 km/h (rok 1997), kdy ze tří signálů 40, 50 a 60 km/h nadále dávaly smysl jen dva, což zřejmě nebylo efektivní. V současné době fungují rychlostní signály např. v Hradci Králové.



Obr. 6-6. Koordinace, tzv. zelená vlna. Zeleně jsou vyznačeny doby zelené na koordinovaném tahu. Červeně jsou vyznačeny dělící body a jejich vzájemná vzdálenost  $L$ . Jsou-li křižovatky ve vzdálenosti rovné celému násobku  $L/2$ , pak je lze oboustranně koordinovat. Je-li vzdálenost jiná, pak oboustranná koordinace není možná, resp. vede k nedostatečně dlouhé zelené pro vedlejší komunikaci, viz křižovatka nejvíce vpravo. Sklon šraf vyznačujících zelenou vlnu odpovídá rychlosti.



Obr. 6-7. Signální trychtýř – rychlostní signály, při jejichž dodržení řidič přijede k následující křižovatce v době zelené. Vpravo fotografie reálného rychlostního návěstidla (Hradec Králové, Rašínova třída, září 2010)

Další výhodou světelně řízených křižovatek je možnost preferovat vybrané účastníky provozu, např. veřejnou hromadnou dopravu. Adámek [2014] dle svých zkušeností z Prahy konstatuje, že lze dosáhnout výrazného snížení doby zdržení veřejné hromadné dopravy, aniž by to mělo negativní vliv na již přetíženou automobilovou dopravu.

Řízení lze nastavit tak, aby se vyrovnaly rozdíly mezi vozidly v různých směrech, tzn. aby doba zdržení byla pro všechny vjezdy (téměř) shodná, nebo naopak lze některé vjezdy omezit. Lze tak např. regulovat vjezd do měst – nepustit do něj v jeden okamžik více vozidel, než je únosné. Obdobou je Ramp Metering zmíněný výše.

Jako výhoda SSZ je uváděna i vyšší bezpečnost a menší psychické zatížení řidičů. Při rozsáhlém zavádění SSZ v Praze poklesla nehodovost o 40 % - nehodovost byla sledována rok před a rok po zavedení SSZ [Medelská, 1991]. Naopak Adámek [2011b] uvádí, že v současné době vykazují v Praze vyšší nehodovost právě řízené křižovatky. Jako důvod uvádí samotný princip řízení – přerušování dopravního proudu.

Nevýhodou oproti neřízeným křižovatkám jsou náklady na zřízení a provoz (údržbu) SSZ. Dále se na světelně řízených křižovatkách dle Zákona 361/2000 Sb. nesmí otáčet.

V případě použití pevného signálního plánu rovněž hrozí zvyšování doby zdržení v málo zatížené části dne, což se řeší dynamickým (dopravně závislým řízením), příp. vypnutím SSZ.

Kapacita vjezdu principiálně vychází z kapacity jízdního pruhu, nazývané saturovaný tok, a podílu doby zelené na délce cyklu.

$$K_i = I_{SAT,i} * (Z_i / C) \quad (6.1)$$

kde

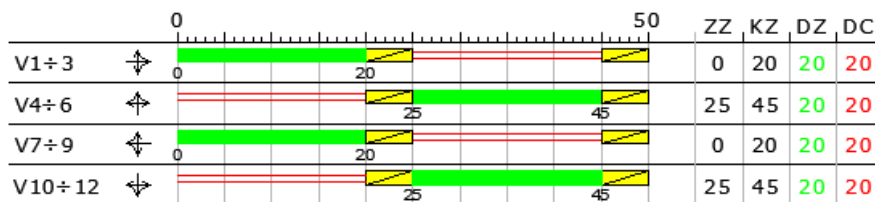
$K_i$  je kapacita i-tého vjezdu [voz/h]  
 $I_{SAT,i}$  saturovaný tok i-tého vjezdu [voz/h]  
 $Z_i$  doba zelené i-tého vjezdu [s]



## C doba cyklu [s]

Nejvyšší saturovaný tok se uvádí od 1800 (TP 81) až po 2000 (TP 235) vozidel za hodinu, přičemž se dle těchto předpisů dále snižuje v závislosti na dovolené rychlosti vozidel, šířce jízdního pruhu, poloměru zatáčení, sklonu nivelety, počtu přecházejících chodců v podmíněně kolizním směru apod. Saturovaného toku je dle TP 235 *nejvyšší počet vozidel, která mohou projet profilem stopčáry<sup>67</sup> za jednotku času při ideálních dopravních podmínkách.*

Řízení dopravy strážníkem na křižovatkách se v Československu začalo praktikovat 2. září 1919 na pražském Můstku, což byla zároveň premiéra dopravní policie. Dopravní strážník řídil dopravu jiným způsobem než dnes – zatímco nyní nechává na jeden postoj projet kolonu vozidel, tehdy signalizoval každému vozidlu zvlášť. V roce 1927 byla zřízena první československá světelně řízená křižovatka, opět v Praze, ale tentokrát u Masarykova nádraží. SSZ bylo řízeno ručně, automatické řízení bylo zavedeno teprve později, přičemž pak byla zároveň zřízena první koordinace. Návěsti SSZ byly odlišné – na zelenou se mohlo jet přímo a odbočovat vlevo; odbočit vpravo bylo možné až poté, co zelenou vystřídala žlutá (levostranný provoz!). Žlutá se návěstila všem směrům současně a trvala 4 až 6 sekund, zelená se návěstila současně s červenou v kolizním směru a trvala 20 až 25 sekund. Čtyřstranné návěstidlo bylo umístěno uprostřed křižovatky a bylo pověšeno na převěsu<sup>68</sup> (tak jak to i v současnosti bývá např. ve Vídni), nebo umístěno na sloupu. Další pokrok SSZ nastal v roce 1978, kdy bylo na pražském Pankráci zapojeno oblastní řízení 8 SSZ [Machutová, 2009].



Obr. 6-8. Signální plán prvorepublikových křižovatek překreslený dle slovního popisu Machutové [2009].

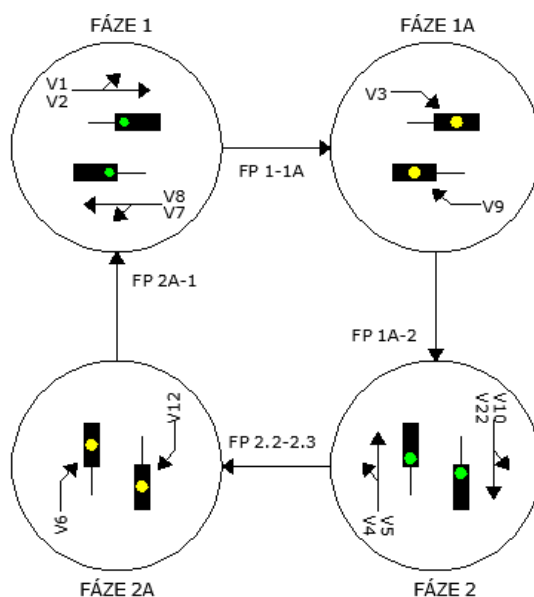
Během socialismu bylo na významných křižovatkách běžné ruční řízení SSZ, kvůli čemuž byly na křižovatkách zřízeny budky pro příslušníky VB. Některé se dožily i 90. let, v Brně např. na křižovatkách Hlinky x Bauerova a Lidická x Koliště. Příslušník VB byl schopen na rozdíl od tehdejší elektroniky křižovatku řídit dynamicky.

První světelně řízená křižovatka na světě byla dle Wikipedie zřízena roku 1868 v Londýně, první automatická na konci 90. let 19. století ve Spojených státech.

<sup>67</sup> Vodorovná dopravní značka V 5, V 6a, nebo V 6b

<sup>68</sup> Převěs je označení pro (přibližně) vodorovné lano, které nese trakční vedení, značky, veřejné osvětlení apod.





Obr. 6-9. Schéma signálních fází prvorepublikových křižovatek překreslený dle slovního popisu Machutové [2009]. Kvůli odlišnému významu jsou doplněny i tehdy používané signály.

### 6.1.1.1 Signální plán

Návrh signálního plánu se řídí TP 81. Rovněž je nutno vycházet ze Zákona o 361/2000 Sb. o provozu na pozemních komunikacích, který předepisuje chování řidičů při jednotlivých signálech.

Dvojice křižovatkových pohybů na křižovatce lze rozdělit do tří skupin:

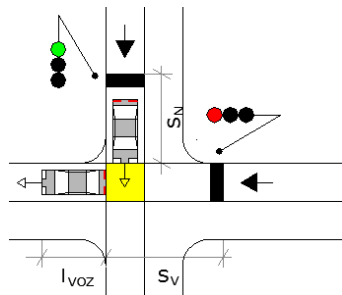
- kolizní – kříží se, nesmí mít volno zároveň, např. kolmé vjezdy
- nekolizní – nekříží se, mohou mít volno zároveň, např. protisměrné vjezdy při jízdě přímo
- podmíněně kolizní – kříží se, mohou mít volno zároveň, přičemž vzájemná přednost se určí dle pravidel silničního provozu, zejména povinnosti řidiče při odbočování vlevo dát přednost protijedoucím vozidlům a tramvajím, jedoucím ve stejném směru.

	plný signál	podmíněně kolizní
	směrová šipka	nekolizní

	<p>doplňková šipka (vlevo) vyklizovací šipka (vpravo)</p>	<p>podmíněně kolizní/nekolizní nekolizní</p>
--	---	--

Obr. 6-10. Signály návěstidel SSZ.

Pro dvojice navzájem kolizních křižovatkových pohybů je třeba spočítat **mezičasy**, tzn. minimální dobu mezi koncem volna pro pohyb, který křižovatku vyklizuje, a mezi začátkem volna pro pohyb, který do křižovatky najíždí.



Obr. 6-11. Vozidlo jedoucí zprava doleva křižovatku vyklizuje (již jeho vjezdu svítí červená), vozidlo jedoucí ze shora dolů do křižovatky najíždí (již jeho vjezdu svítí zelená). Vyznačena je kolizní plocha, vyklizovací a najížděcí dráha.

Mezičas se vypočte odečtením najížděcí doby od doby vyklizovací a přičtením bezpečnostního odstupu:

$$M = t_V - t_N + BO \quad (6.2)$$

Kde:

- $M$  je mezičas [s]
- $t_V$  vyklizovací doba [s]
- $t_N$  najížděcí doba [s]
- $BO$  bezpečnostní odstup [s]

Přičemž

$$t_V = (S_V + l_{VOZ}) / V_V \quad (6.3)$$

$$t_N = S_N / V_N \quad (6.4)$$

Kde:

- $S_V$  je vyklizovací dráha [m]
- $S_N$  najížděcí dráha [m]
- $l_{VOZ}$  délka vozidla [m]
- $V_V$  vyklizovací rychlost [m/s, resp. km/h]
- $V_N$  najížděcí rychlost [m/s, resp. km/h]

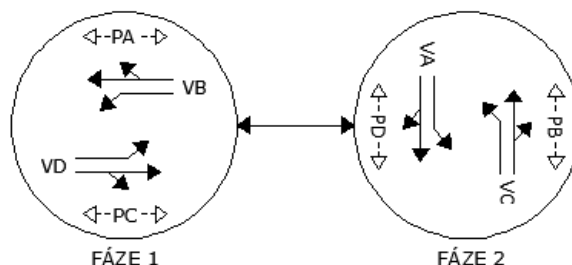
	motorové vozidlo	pěší	tramvaj
--	------------------	------	---------

najížděcí/vyklizovací rychlost v přímé [km/h]	35	5	25
najížděcí/vyklizovací rychlost v oblouku [km/h]	25	5	10÷25*
délka vozidla [m]	5	0	15**
bezpečnostní odstup – uvedené vozidlo vyklizuje [s]	2	0	0

Tab. 6-12. Doporučené hodnoty pro výpočet mezičasů dle TP 81. \*dle výhybek a poloměru.  
\*\*předpokládá se, že dlouhá vyklizující tramvajová souprava je pro najíždějící řidiče nepřehlédnutelná.

Z uvedeného výpočtu je patrná, jaká úroveň bezpečnosti je zajištěna. Teoreticky stačí jet na poslední ze tří sekund žluté a dojde ke kolizi. Rovněž rychlejší najetí do křižovatky způsobí nehodu. V této souvislosti může být kontraproduktivní výzvoové návěstidlo pro tramvaje, které řidiče tramvaje upozorní na blížící se signál volno – řidič tramvaje je schopen jet tak, aby v době začátku volna již měl plnou rychlost. Tramvaje navíc nemají žádný bezpečnostní odstup, přestože jejich zpomalení je nižší než u motorových vozidel. Bezpečnost tedy závisí na pozornosti řidiče, který musí před vjezdem do křižovatky počítat s tím, že někdo ještě může vyklizovat.

Do **signální skupiny** patří všechny křižovatkové pohyby, které mají v každém okamžiku stejný signál. Navzájem nekolizní nebo podmíněně kolizní pohyby (resp. jim odpovídající signální skupiny) lze sdružovat do **fází**, které dohromady tvoří **cyklus**. Na obrázku 6-13 je nejjednodušší schéma fází pro průsečnou křižovatku. Levá odbočení jsou podmíněně kolizní.

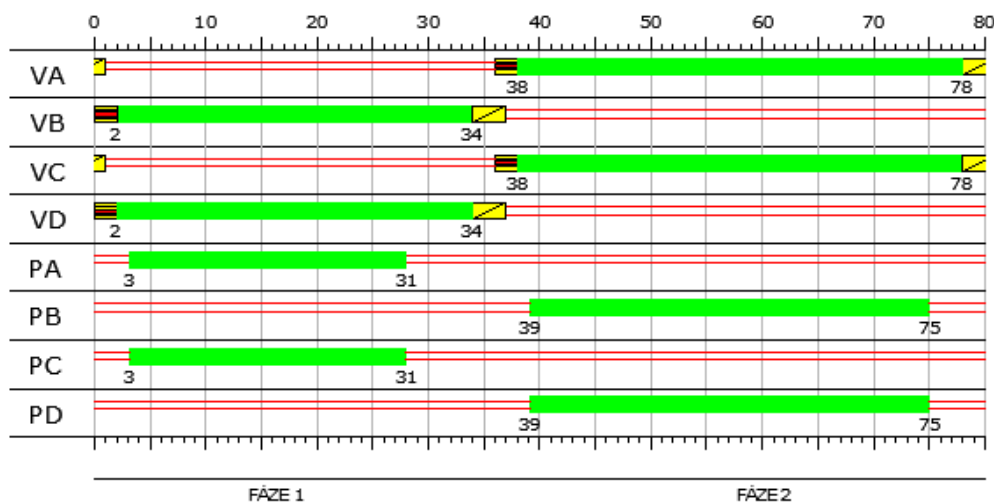


Obr. 6-13. Schéma fází průsečné křižovatky s podmíněně kolizním levým odbočením.

Označení signálních skupin použité v té práci je:

- první znak
  - V – vozidla (plný nebo směrový signál)
  - S – vozidla (doplňková zelená šipka)
  - K – vozidla (vyklizovací šipka)
  - P – pěší
- druhý znak
  - paprsek vjezdu, resp. paprsek, přes který přecházejí chodci
- případný třetí znak
  - paprsek výjezdu

Kód VBC tak znamená signální skupinu pro vozidla jedoucí z paprsku B do paprsku C.



Obr. 6-14. Nejjednodušší signální plán průsečné křižovatky; použito řízení se dvěma fázemi (dle obr. 6-13).

## 6.2 Zákaz levého odbočení

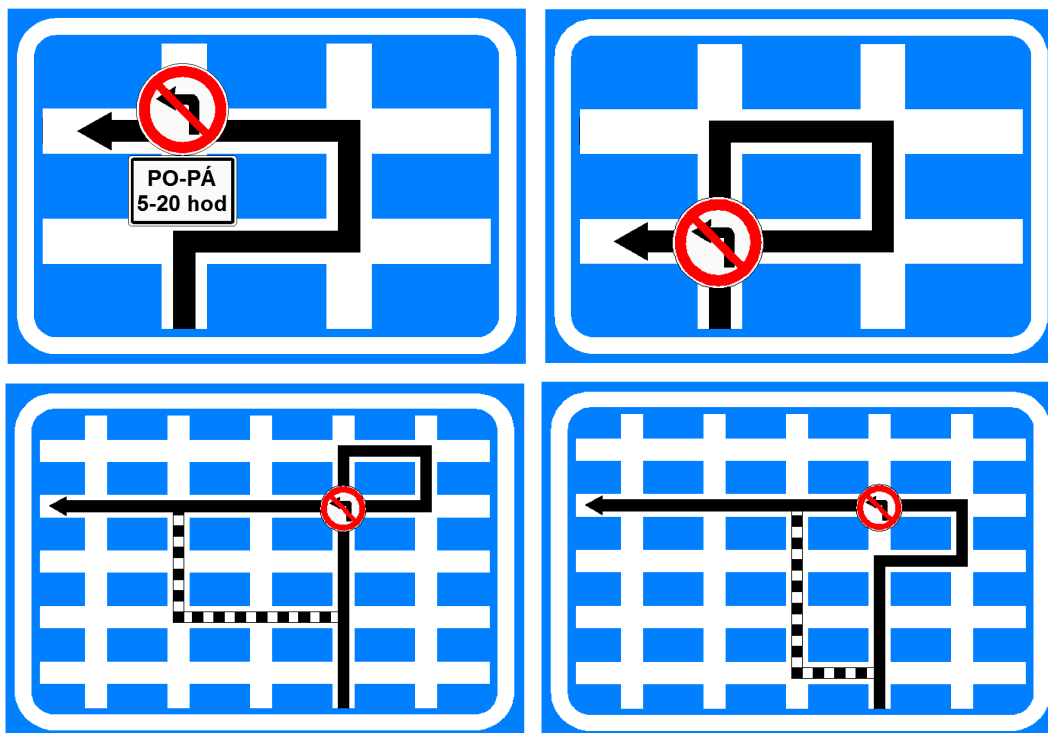
V zemích s pravostranným provozem musí vozidla odbočující vlevo dávat přednost vozidlům jedoucím v protisměru<sup>69</sup>. To u úroňových křižovatek vyvolává nutnost zřídit samostatný řadicí nebo odbočovací pruh, aby vozidla jedoucí přímo nebo odbočující vpravo nebyla blokována vozidly odbočujícími vlevo čekajícími na mezeru v protisměrném dopravním proudu.

Při nedostatku místa je lákavým řešením nápravy kapacitně nevyhovující úroňové křižovatky zákaz levého odbočení, a tím uvolněním společného řadicího pruhu od vozidel čekajících na odbočení vlevo, nebo zrušení samostatného pruhu pro odbočení vlevo a jeho využití pro ostatní směry. Ke zlepšení intuitivně dojde, je-li vysoká intenzita vozidel jedoucích přímo nebo vpravo a nízká intenzita vozidel odbočujících vlevo.

Zároveň se zákazem levého odbočení zjednoduší návrh signálního plánu, jedná-li se o křižovatku řízenou. Není tak nutno zřizovat samostatnou fázi pro levé odbočení a tím ukrajovat z doby zelené pro zbylé směry. V kombinaci více pruhů pro směr přímo a řízení křižovatky lze dosáhnout násobného zvýšení celkové kapacity křižovatky. Rovněž se snížením počtu fází dochází ke snížení počtu mezičasů, tzn. ke snížení neproduktivní doby cyklu.

Levé odbočení obecně nemusí být zakázáno stále, ale jen v jistou část dne, např. v dopravní špičce. Mimo dopravní špičku může být kapacita křižovatky dostatečná i bez zakázaného levého odbočení, takže případná zajižďka by byla kontraproduktivní. S využitím proměnného dopravního značení a zařízení pro provozní informace lze tento zákaz vyhlášovat dle aktuální dopravní situace. Alternativou, v Brně běžně využívanou, je dodatková tabulka s vyznačením platnosti zákazu, např. 5-20 hod. nebo PO-PÁ 5-20 hod.

<sup>69</sup> § 21 odst. 5 zákona 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích: "Řidič odbočující vlevo musí dát přednost v jízdě protijedoucím motorovým i nemotorovým vozidlům, jezdcům na zvířeti, protijedoucím organizovaným útvarům chodců a průvodcům hnaných zvířat se zvířaty, tramvajím jedoucím v obou směrech a vozidlům jedoucím ve vyhrazeném jízdním pruhu, pro něž je tento jízdni pruh vyhrazen."



Obr. 6-15. Alternativní trasy k zakázanému levému odbočení ve formátu značky IS 9e Návěst před křižovatkou. Lze najít objízdné trasy pouze s pravým odbočením (pro případ, že by měla být zakázána všechna levá odbočení) a trasy stejně dlouhé, jako trasa zakázaná (zákaz levého odbočení v tomto případě nevede k nárůstu ujeté vzdálenosti).

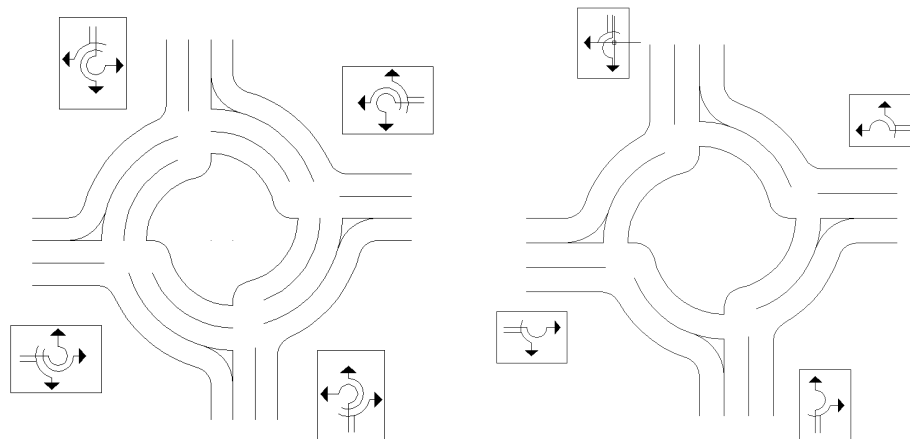
Řekne-li se, že zákazem levého odbočení dojde ke zvýšení kapacity jednotlivé křižovatky a zkrácení doby zdržení na jednotlivé křižovatce, muselo by být se zároveň říct, že dopad na ostatní křižovatky a síť jako celek nemusí být zdaleka příznivý. Vozidla dosud v křižovatce odbočující vlevo by musely jet jinou trasou (viz obr. 6-15), přesněji jednou z mnoha jiných, dostupných tras. Tak by pozitivně či negativně ovlivňovaly zatížení dalších komunikací a křižovatek, čímž by změnily atraktivitu i pro ostatní řidiče a opět přerozdělily zatížení sítě, viz kap. Z-Z. Tyto dopady lze prognózovat pouze pomocí strategického modelu dopravní sítě.

### 6.2.1 Neřízené průsečné a stykové křižovatky

Na neřízených křižovatkách je vhodné zakázat levé odbočení v případě neexistence samostatného pruhu pro levé odbočení, které omezuje jízdu vozidel přímo a vpravo.

### 6.2.2 Okružní křižovatky

Na okružních křižovatkách je zákaz levého odbočení nemožný. Smysl by měl jen u spirálových okružních křižovatek (tzv. turbo), kde se vozidla již před křižovatkou zařazují do řadících pruhů dle své další jízdy. Zákaz levého odbočení by přinutil část řidičů jet jinudy, což by mohlo vést k odlehčení přetížené okružní křižovatky. Zároveň by tím došlo ke snížení potřebného počtu pruhů na okružním páse.



Obr. 6-16. Vlevo "učebnicová" spirálová okružní křižovatka, vpravo spirálová křižovatka neumožňující jízdu vlevo.

### 6.2.3 Světelně řízené průsečné a stykové křižovatky

Na méně zatížených světelně řízených křižovatkách lze levé odbočení realizovat jako podmíněně kolizní, několik vozidel odbočujících vlevo může odbočit v době mezery v protisměrném proudu, případně na konci fáze – odbočující vozidla v době své zelené vjedou do křižovatky, kde čekají na mezeru v protisměrném proudu vozidel; zbylá vozidla v okamžiku konce zelené v protisměru, tzn. v době mezičasu, dokončí odbočení. Je-li proud vozidel jedoucích přímo plně saturován a nejsou v něm mezery pro vozidla odbočující vlevo, musí všechna vozidla odbočující vlevo odbočit až na konci fáze, resp. v době mezičasu, což je kapacitně omezeno z důvodů vozidel již přijíždějících v kolizním směru. Odbočení je pak nutné řešit jako nekolizní.

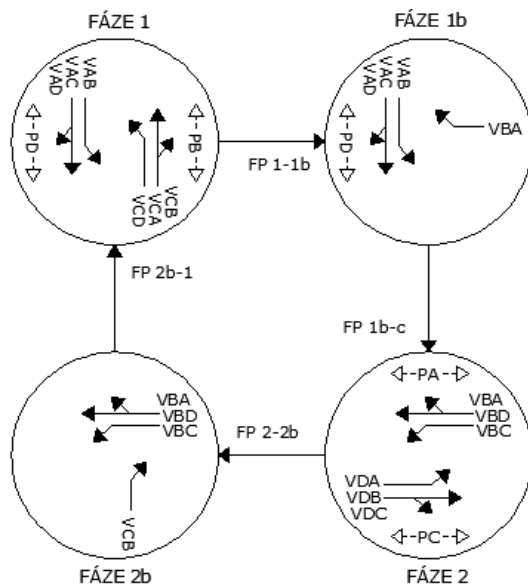
Při kolizním odbočení musí řidič navíc dát přednost chodcům přecházejícím ve volném směru po přechodu pro chodce a cyklistům přejíždějícím ve volném směru po přejezdu pro cyklisty<sup>70</sup>. Dalším omezením by nastalo v případě vedení tramvaje či vyhrazeného jízdního pruhu z vjezdu, ze kterého řidič odbočuje.

Nekolizní odbočení vlevo lze řešit více způsoby. Prvním z nich je vyklizovací šipka. Na konci fáze se uvolní vytvořená fronta vozidel čekajících vlevo ponecháním zelené v jejich směru, ale zastavením protisměrného provozu. Toto opatření lze v jednom cyklu realizovat jen pro jeden z protisměrných vjezdů, viz obr. 6-17, ze kterého je také patrná možnost umožnění pravého odbočení na doplňkovou šipku vpravo a dále přecházení chodců, kteří jsou další fází omezeni. Možnost podmíněně kolizního levého odbočení při mezeře v protisměrném jízdním proudu během fází 1 (nikoli 1b) a 2 (nikoli 2b) dle obr. 6-17. není použitím vyklizovací šipky omezena, tzn. při tomto návrhu dochází ke kombinaci podmíněně kolizního a nekolizního odbočení vlevo.

Dalším způsobem řešení levého nekolizního odbočení je použití směrových signálů. Levé odbočení je tak realizováno v samostatné fázi spolu s protisměrným levým odbočením dle obr. 6-18, nebo spolu s jízdou přímo a vpravo ze stejného vjezdu dle obr. 6-19. Druhá uvedená možnost umožňuje zajistit plynulou jízdu i z vjezdu, na kterém není možno zřídit samostatný řadič pruh pro odbočení vlevo, neboť vozidla jedoucí přímo, vpravo i vlevo mohou jet ve stejné fázi a přitom nejsou omezovaná protisměrným proudem. Užití směrových signálů je podmíněno nekolizním odbočením, tzn. nelze užít směrové šipky pro odbočení, které je pod-

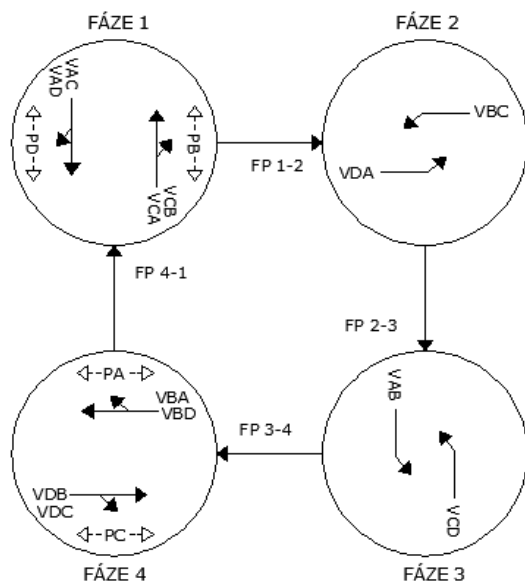
<sup>70</sup> § 70 odst. 2c zákona 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích

míněně kolizní s protijedoucím proudem vozidel; je však možné při doplnění o žlutý symbol chodce odbočení podmíněně kolizní s přecházením chodců<sup>71</sup>, byť z hlediska účelu přidávání fází pro nekolizní odbočení to v běžných případech nemá smysl.



Obr. 6-17. Schéma fází: Dvě základní fáze doplněné o fáze vyklizovací šipky, umožňující kapacitní levé odbočení z vjezdu A a B.

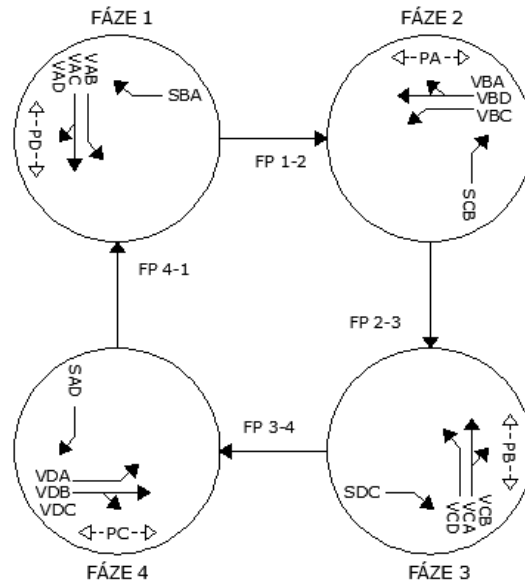
Uvedené způsoby lze kombinovat a získávat tak další schémata fází. Další schémata vznikají při nutnosti zohlednit veřejnou dopravu, která využívá tramvajové pásy, resp. vyhrazené jízdní pruhy.



Obr. 6-18. Schéma fází: Čtyři fáze, z toho dvě fáze pro jednotlivá levá odbočení.

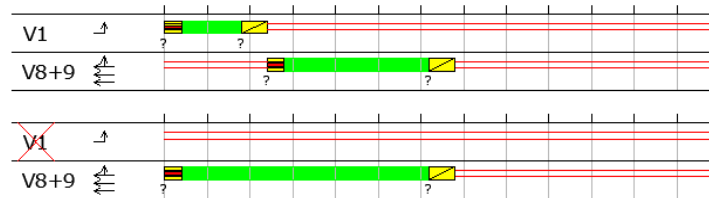
<sup>71</sup> § 70 odst. 2e a 2f zákona 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích





Obr. 6-19. Schéma fází: Čtyři fáze, každá fáze pro jeden vjezd.

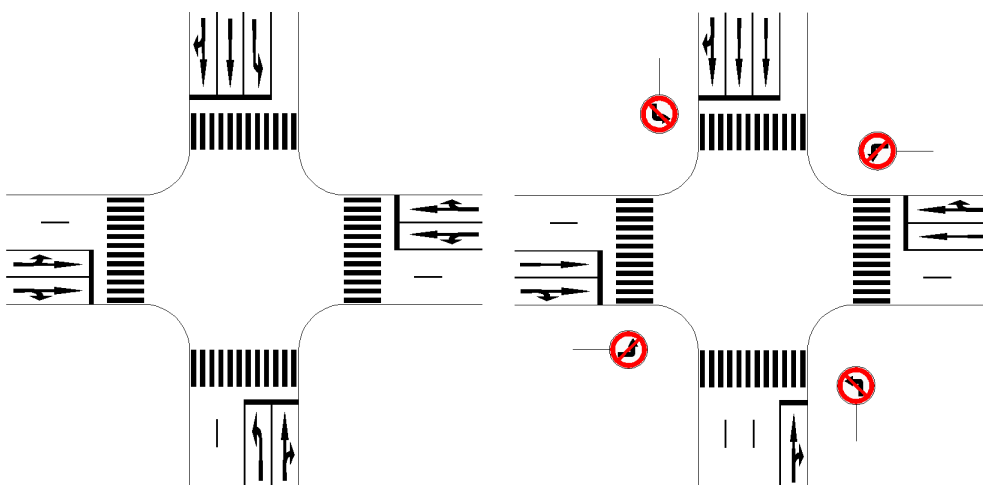
Pokud pro přehlednost bude křižovatku zjednodušena na dva navzájem kolizní pohyby – odbočení vlevo a protisměrný pohyb přímo, tak lze vypočítat celkovou kapacitu křižovatky. Při uvažování saturovaného toku 2000 voz/h v přímém směru, 1800 voz/h při odbočení vlevo a jednoho mezičasu 4 s, lze dopočítat, že celková kapacita křižovatky se bude dle podílu zelené pro směr přímo a vlevo pohybovat od 1 800 do 6 000 voz/h.



Obr. 6-20. Výřez ze signálního plánu po zákazů levého odbočení – doba zelené původního levého odbočení prodloužila novou dobu zelené pro protisměrný vjezd.

odbočení vlevo		mezičasy	jízda přímo			celkem			
kapacita	doba zelené		doba zelené	kapacita			kapacita		
1 pruh [voz/h]	[s]		[s]	1 pruh [voz/h]	2 pruhy [voz/h]	3 pruhy [voz/h]	1 pruh [voz/h]	2 pruhy [voz/h]	3 pruhy [voz/h]
0	0	0	3 600	2 000	4 000	6 000	2 000	4 000	6 000
300	600	320	2 680	1 489	2 978	4 467	1 789	3 278	4 767
600	1 200	320	2 080	1 156	2 311	3 467	1 756	2 911	4 067
900	1 800	320	1 480	822	1 644	2 467	1 722	2 544	3 367
1 200	2 400	320	880	489	978	1 467	1 689	2 178	2 667
1 500	3 000	320	280	156	311	467	1 656	1 811	1 967
1 800	3 600	0	0	0	0	0	1 800	1 800	1 800

Tab. 6-21. Orientační výpočet kapacity dle signálního plánu na obr. 6-20. Doba cyklu je určena 90 s – určení doby cyklu je nutné kvůli určení počtu mezičasů.

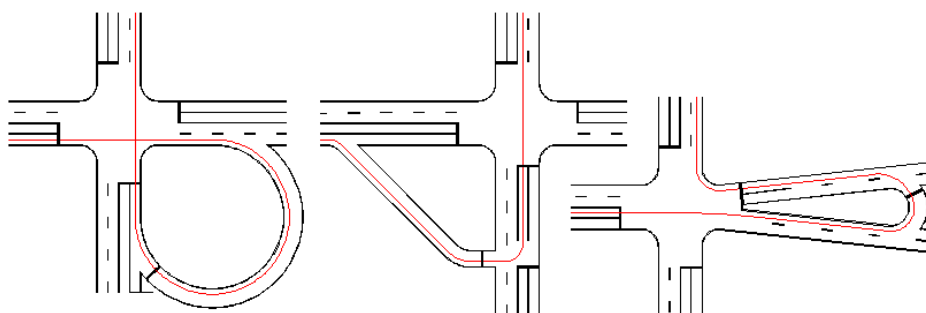


Obr. 6-22. Využití řídicího pruhu zakázaného směru pro některý/é ze zbylých směrů.

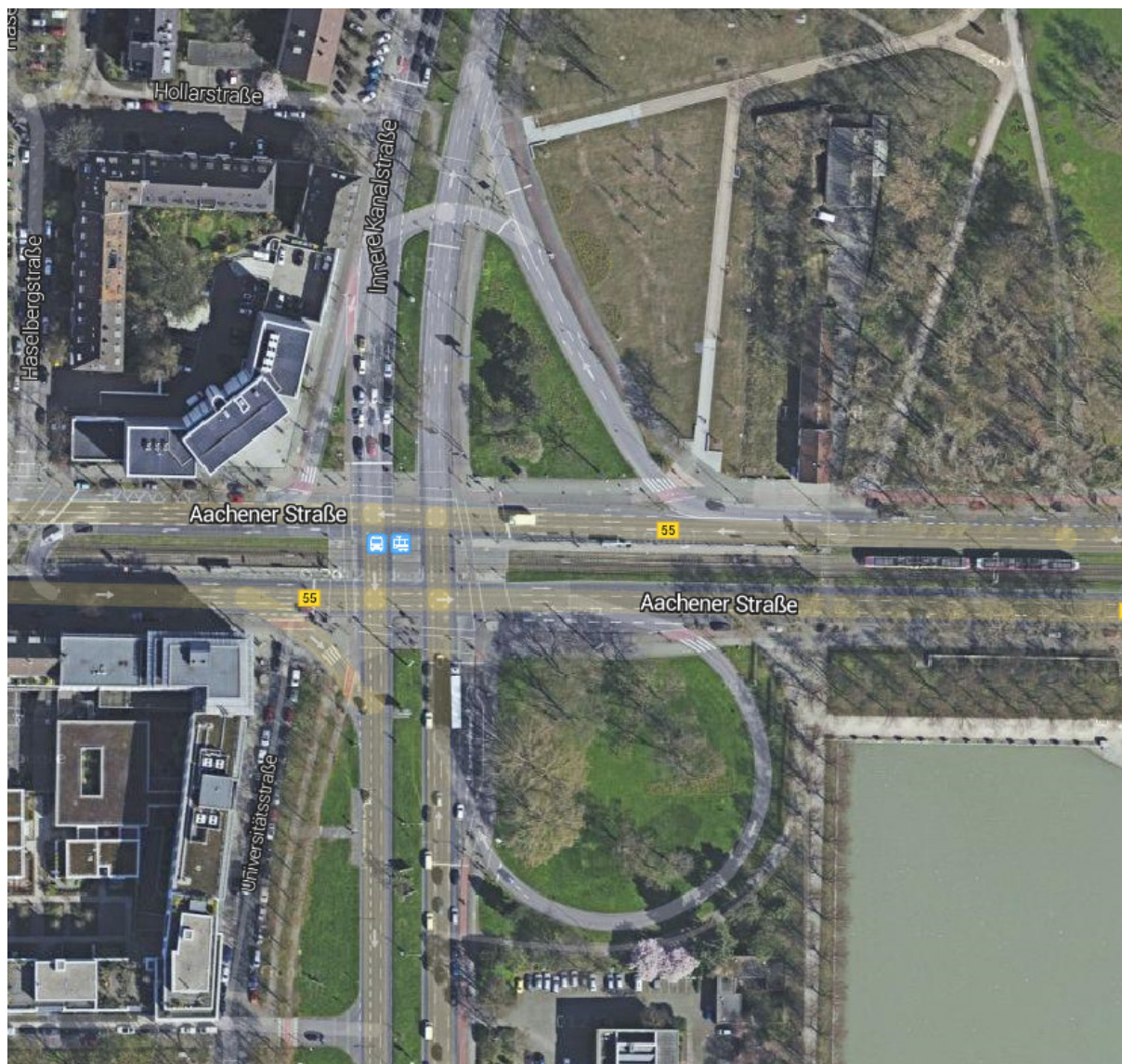
#### 6.2.4 Nekonvenční křižovatka

Nechtěné odbočení vlevo v prostoru křižovatky lze nahradit netypickým (nekonvenčním) uspořádáním křižovatky, kdy levé odbočení je uskutečněno mimo hlavní prostor křižovatky.

- **Vratná větev** za výjezdem z křižovatky: Řidič, který chce odbočit vlevo, projede křižovatku rovně (nejlépe pravým pruhem) a za křižovatkou se na vratné větvi otočí doprava o 300 gradů do původně požadovaného směru a pokračuje stejnou křižovatkou opět rovně. Nevýhodou je průplet s vozidly, které odbočují vpravo se stejném kvadrantu, jako je vratná větev.
- **Polopřímá větev** před vjezdem do křižovatky: Řidič, který chce odbočit vlevo, odbočí před vjezdem křižovatky doprava na polopřímou větev, která ho napojí do sousedního vjezdu křižovatky (vpravo od vjezdu, ke kterému přijížděl).
- **Otočná větev** za křižovatkou: Řidič, který chce odbočit vlevo, projede křižovatku rovně (nejlépe levým pruhem), za křižovatkou se otočí a do křižovatky vjede v opačném směru, než přijel, a odbočí doprava.



Obr. 6-23. Zleva vratná větev, polopřímá větev a otočná větev



*Obr. 6-24. Nekonvenční křižovatka Aachenner Strasse a Innere Kanalstrasse v Kolíně nad Rýnem. Podklad (google.com) je orientován horním okrajem na sever, tramvajový vlak v pravé části má 60 m délky. Vozidla jedoucí ze západu na sever používají vratnou větev v jihovýchodním kvadrantu. Vozidla jedoucí z východu na jih používají polopřímou větev v severovýchodním kvadrantu. Vozidla jedoucí ze severu na východ se otáčejí na západním paprsku a jízda z jihu na západ není možná.*

### 6.2.5 Zákaz jízdy přímo

Opakem k zákazu odbočení vlevo je zákaz protisměrné jízdy přímo. Řidiči musejí využít jinou trasu. Otázkou pak je právě odbočení, které může při dostatku prostoru být ponecháno, protože může být s ostatními křižovatkovými pohyby nekolizní, pokud bude připojeno dostatečně dimenzovaným připojovacím pruhem.





*Obr. 6-25. Příklad křižovatky se zákazem jízdy přímo: Křižovatka ulic Heršpické (svisle, tzn. severojižně) a Bidláků (vodorovně) v Brně. Z ulice Bidláků je možné odbočit vpravo a vlevo, není však možné jet přímo, čímž odpadá jedná z fází signálního plánu.*

### 6.2.6 Zjednosměrnění dopravní sítě

Zjednosměrnění komunikační sítě odstraní hlavní problém levých odbočení – kolize s protijedoucím dopravním proudem. Vlevo odbočující vozidla "pouze" musejí umožnit přecházení chodců v souběžném směru stejně, jako to činí vozidla odbočující vpravo.

Většina jednosměrných komunikací je jednosměrných z důvodu úspory místa – dva jízdní pruhy do daného profilu buď nelze z důvodu šířky umístit vůbec, nebo je potřeba využít uliční prostor k jiným účelům, např. pro parkování a odstavení vozidel. I tak lze ale snadno najít ukázky zjednosměrnění hlavních ulic – např. tzv. pražská magistrála je v centrální části města vedena ulicí Legerovou na sever a ulicí Sokolskou na jih. Obě souběžné ulici jsou od sebe vzdáleny necelých 100 metrů, přičemž obě mají 3 až 4 jízdní pruhy svého směru.

### 6.2.7 Mimoúrovňové křižovatky

Mimoúrovňové křižovatky jsou velmi nákladnou záležitostí, zvláště jedná-li se o typy bez křížných a průpletových kolizních bodů, protože ty vyžadují vyšší počet mostních objektů a nezanedbatelné nejsou ani prostorové nároky. Absence některých směrů tak dokáže křižovatku výrazně zjednodušit, zlevnit a zmenšit její plošný, i výškový rozsah.



Obr. 6-26. Příklad mimoúrovňové křižovatky s omezením některých odbočení. Křižovatka dálnice D1 a silnice II/602 u Kývalky západně od Brna. Jízda od Popůvek na dálnici na Brno je možná jen s využitím vratné větve, která je ale kvůli svému provizornímu charakteru trvale uzavřená (červeně). Naopak vratná rampa pro jízdu z dálnice od Brna směr Popůvky je trvale otevřená (zeleně). Jízda od Prahy na Rosice a naopak je nemožná, což ovšem nevadí, protože je logičtější sjet z dálnice / na dálnici blíže od Prahy.

### 6.2.8 Rozsah úlohy levého odbočení

Na jedné průsečné křižovatce jsou 4 potenciální levá odbočení. Zakázat lze kterákoli z nich, aniž by zákaz ztrácel, resp. zákazy ztrácely smysl. Jedno levé odbočení nabývá dvou hodnot (povoleno, zakázáno), které nastávají na čtyřech vjezdech do křižovatky, což lze zapsat vztahem 6.5.

$$PZ,K = PS^{PV} = 2^4 = 16 \text{ variant} \quad (6.5)$$

kde

$PZ,K$  je počet variant zákazů na jedné průsečné křižovatce

$PS$  počet stavů, kterých může vjezd nabýt (vlevo povoleno, vlevo zakázáno)

$PV$  počet vjezdů, které jsou na jedné průsečné křižovatce

Počet variant roste s uvažováním více křižovatek, na kterých by se levá odbočování zakazovala. Vzhledem k možnosti jet vlevo s využitím více pravých odbočení (obr. 6-15) lze uvažovat i s variantou zákazu všech levých odbočení v síti. Obdobně jako vztah (6.5) pro počet zákazů na jediné křižovatce lze vytvořit i vztah (6.6) pro počet zákazů na více křižovatkách.

$$PZ,S = PZ,K^{PK} \quad (6.6)$$

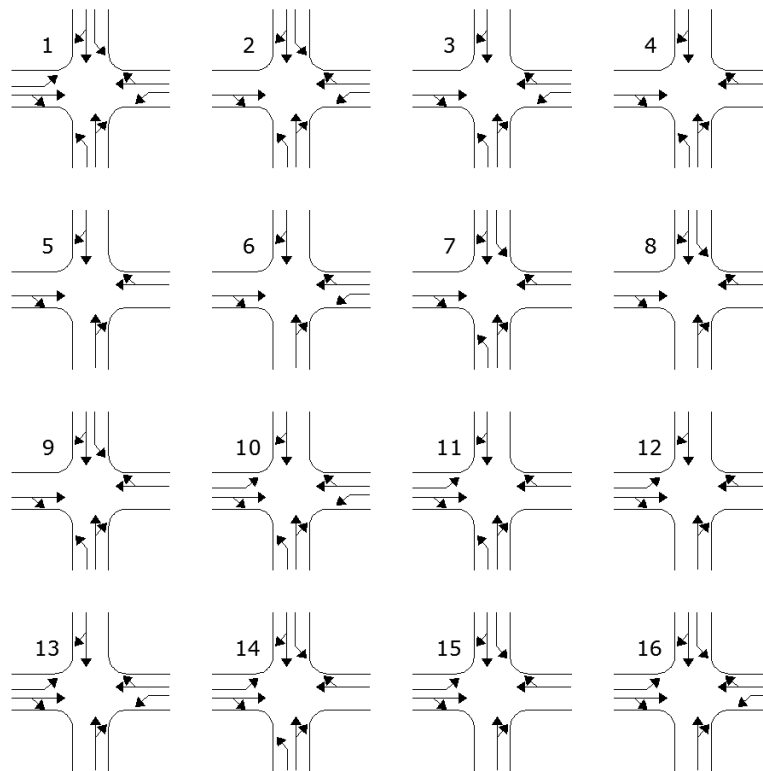
kde

$PZ,S$  je počet variant zákazů na síti

$PZ,K$  počet variant zákazů na jedné průsečné křižovatce

$PK$  počet křižovatek v síti, na kterých se zvažují zákazy

Z tabulky 6-28 je patrný vysoký nárůst počtu variant s narůstajícím počtem křižovatek. Při 50 křižovatkách je to v řádu  $10^{60}$  variant. Z toho je patrná nutnost řešit úlohu takovou optimalizační metodou, která nevyžaduje výpočet všech variant.



Obr. 6-27. 16 kombinací zákazů levých odbočení na jedné průsečné křižovatce

počet křižovatek	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
počet variant	16	256	4096	$10^5$	$10^6$	$10^{12}$	$10^{24}$	$10^{36}$	$10^{48}$	$10^{60}$	$10^{72}$	$10^{84}$	$10^{96}$	$10^{108}$	$10^{120}$

Tab. 6-28. Počty variant zákazů levých odbočení dle počtu křižovatek, u kterých se zakazy uvažuje. Od 4 řešených křižovatek je v tabulce z důvodu rozsahu uveden pouze řád.

Rozšířila-by se úloha i o opak zakazu levého odbočení, totiž o zákaz jízdy přímo, vedlo by to k dalšímu nárůstu počtu variant. Jeden vjezd do křižovatky by tak mohl nabývat tří hodnot (povoleno vše, zakázáno levé odbočení, zakázána jízda přímo). Čtvrtý stav není uvažován, protože by z vjezdu nebylo možno jet nikam. Pravé odbočení může být zakázáno společně s jízdou přímo, nebo může být ponecháno, viz kap. 6.2.5. Vztah 6.5 je nutno upravit na vztah 6.7.

$$PZ,K = PS^{PV} = 3^4 = 81 \text{ variant} \quad (6.7)$$

kde

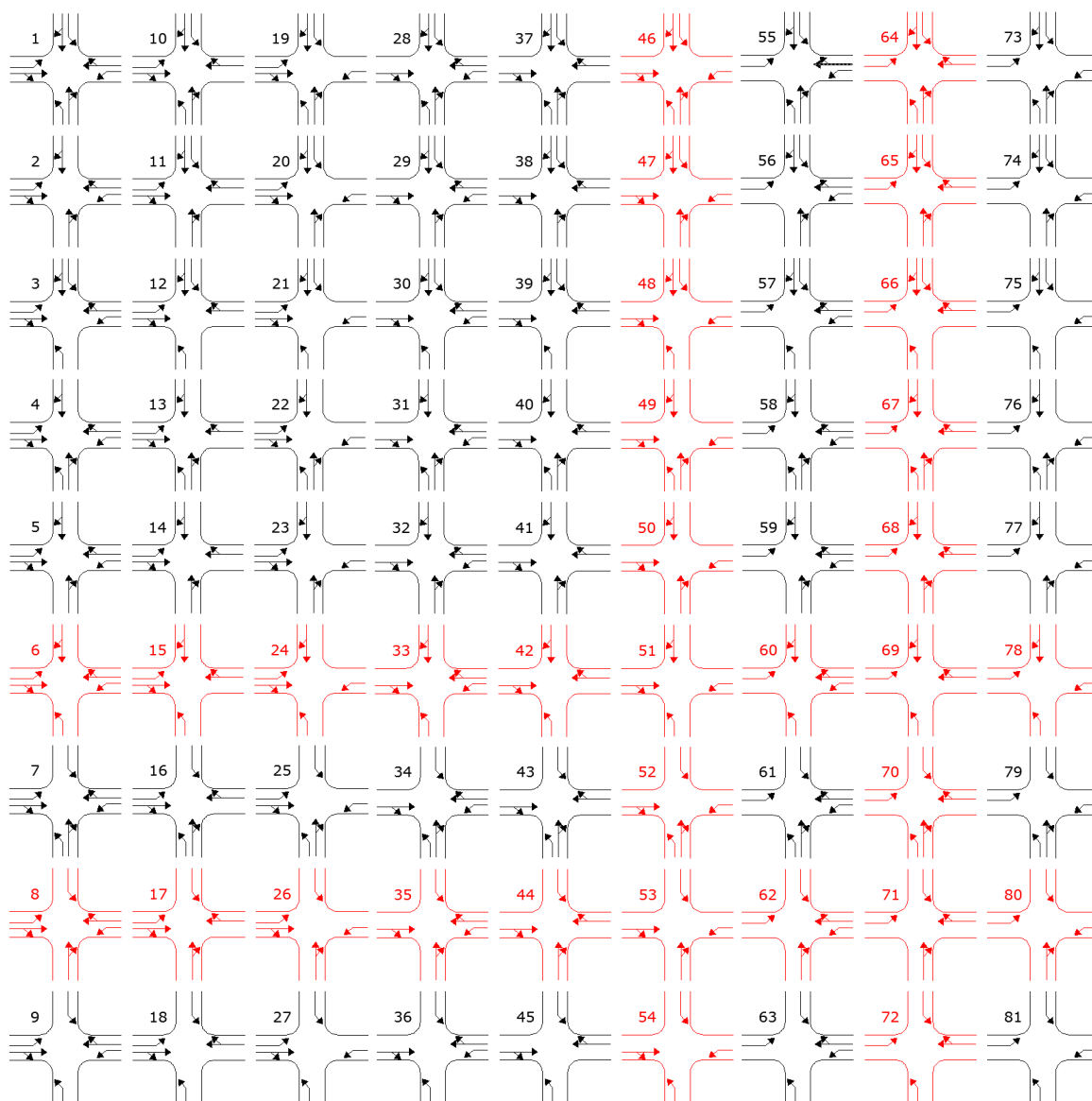
$PZ,K$  je počet variant zákazů na jedné průsečné křižovatce

$PS$  počet stavů, kterých může vjezd nabýt (vše povoleno, zak. vlevo, zak. přímo)

$PV$  počet vjezdů, které jsou na jedné průsečné křižovatce



Ne všech 81 variant zákazů na jedné křižovatce je efektivních – z hlediska sledovaného přínosu, totiž odstranění jednoho ze dvojice kolizních pohybů (jízda vlevo a protisměrná jízda přímo), jsou některé varianty nesmyslné. Celkem je to 32 variant, kde nejsou odstraněny navzájem kolizní pohyby, ale naopak pohyby navzájem nekolizní. Z 81 tak zbývá 49 efektivních variant zákazů na jedné křižovatce, které vykazují znak potenciální efektivity vyplývající ze zákazu jednoho ze dvojice vzájemně kolizních pohybů a zároveň umožňují jízdu z každého vjezdu do alespoň jednoho výjezdu z křižovatky a alespoň jeden vjezd do každého z výjezdů křižovatky.



Tab. 6-29. 81 kombinací zákazů levých odbočení a jízd přímo (a vpravo). Červené jsou ty, ve kterých kombinace zákazů není efektivní. Za pozornost stojí také čísla 1, 41 a 81, která se dají pojmenovat všechno dovoleno, všechna levá odbočení zakázána, všechny jízdy přímo a vpravo zakázány.



Počet variant s počtem křižovatek pochopitelně roste ještě rychleji než případě zákazu pouze levých odbočení – přijme-li se možnost zakazovat i jízdu přímo, počet variant je (dle vztahu 6.7) při 100 řešených křižovatkách v řádu  $10^{169}$ .

počet křižovatek	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	100
počet variant	49	2401	$10^5$	$10^6$	$10^8$	$10^{16}$	$10^{33}$	$10^{50}$	$10^{67}$	$10^{84}$	$10^{169}$

*Tab. 6-30. Počty variant zákazů levých odbočení a jízdy přímo dle počtu křižovatek, u kterých se zakazy uvažuje. Od 4 řešených křižovatek je v tabulce z důvodu rozsahu uveden pouze řád.*

## 7 NAVRŽENÝ OPTIMALIZAČNÍ ALGORITMUS

Tato kapitola popisuje samotný algoritmus, který byl autorem této práce navržen pro otestování možnosti řešit komplexní úlohu návrhu dopravní sítě pomocí systematické optimalizace.

Celý algoritmus včetně modelování sítě byl autorem zakódován v jazyce VBA – alternativou bylo využít nějaký z softwarů určených pro strategické modelování dopravní sítě, kdy by si optimalizační algoritmus pouze volal již existující SW se zadáním varianty a s dotazem na hodnocení této varianty. Výhodou použití již existujícího SW je, že za desetiletí práce mnoha lidí poskytuje velmi sofistikované řešení problematiky zatížení dopravní sítě. Nevýhodou použití již existujícího SW je, že tento je do značné míry "černou skříňkou", tzn. vlastní výpočet je obestřen jistým tajemstvím, kdežto při použití vlastního SW je plná kontrola nad celým výpočtem za cenu většího zjednodušení modelu. Pro účely disertační práce se jevil vhodnější postup s vlastním SW – pro případné pozdější použití v projekční praxi by zřejmě vhodnějším bylo volat si během optimalizace komerční SW.

Obecným cílem algoritmu je tedy najít takové rozložení zákazu křižovatkových pohybů v celé řešené síti, při kterém bude dosaženo optimálního stavu. Za optimální stav bude považována ta varianta zákazů, při které bude prognózován nejkratší průměrný cestovní čas. Jak je popsáno v kapitole 3, nelze obecně prohlásit, že zrovna cestovní čas je to správné kritérium, které má být při optimalizaci dopravní sítě snižováno. Stejně tak není možné jednoznačně říct, že zrovna průměrná hodnota je ta správná, protože pro malé množství uživatelů může dojít k velmi výraznému zhoršení. Volba kritéria a jeho interpretace je v zásadě politickou, proto je pro ověřovací algoritmus zvoleno kritérium v dopravním inženýrství běžné, tj. zmíněná cestovní doba.

Pro ověřovací algoritmus je nutné najít vhodnou síť. Po úvahách, zda práci držet více prakticky a řešit konkrétní lokalitu, nebo více teoreticky a řešit síť zcela obecnou, byla vybrána možnost druhá poskytující jistou míru zobecnění úlohy. Zde je nutno zdůraznit, že každá síť je jiná, ať co se týče topografie, kapacity či dopravní zatížení. Nelze tedy najít univerzálně platné schéma, podle kterého by se síť měla navrhovat tak, aby byla optimální. Opakovaným volením obecné náhodné sítě se ale dle předpokladu dá omezit vliv konkrétních parametrů konkrétní sítě na běh algoritmu určeného pro obecné použití.

Zvolena byla síť imitující síť městských komunikací, protože právě města spojují dvě protichůdná východiska pro návrh dopravní sítě – nedostatek prostoru a velké dopravní zatížení. Tomu tedy odpovídá vzdálenost křižovatek a také to, že modelovány jsou křižovatky průsečné, světelně řízené.

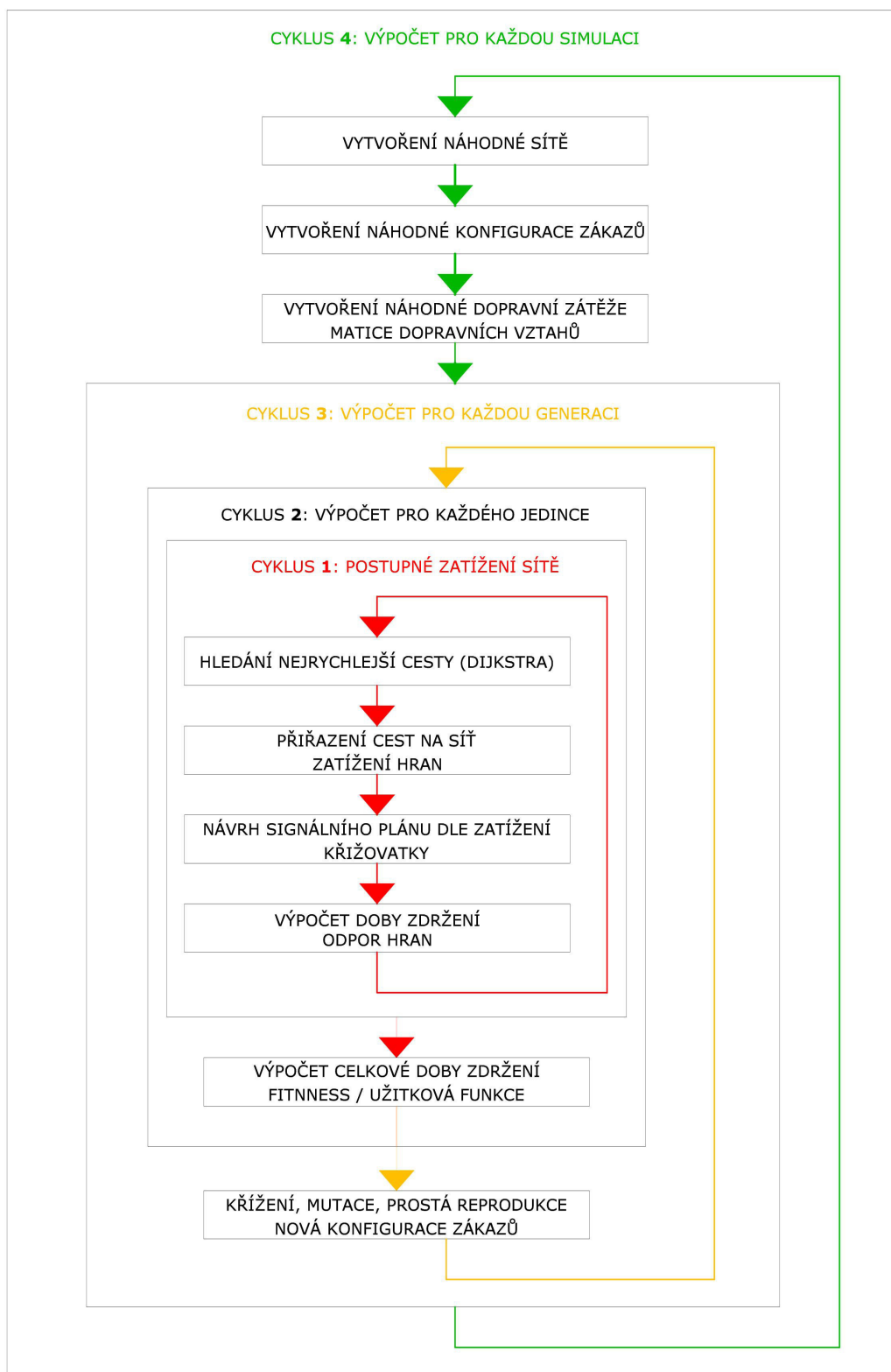
Zatížení dopravní sítě vychází z náhodně generované matice dopravních vztahů a je na síť přidělováno postupně tak, aby další vozidla respektovala již vyčerpanou kapacitu dříve přidělenými vozidly – tento postup se používá ve strategických modelech určených k prognóze jakéhosi rovnovážného stavu, ke kterému v dopravní síti dochází. Pro hledání nejrychlejší trasy slouží Dijkstrův algoritmus. Odpor jednotlivých uzlů sítě, tzn. křižovatek, je počítán standardně, tzn. tak, jak k němu přistupují české technické předpisy – nebylo cílem práce je ověřovat, resp. zpochybňovat. Návrh signálního plánu je plně automatizován, aby mohl běžet v rámci automatizované optimalizace.

Optimalizace samotná probíhá pomocí genetického algoritmu, který z nejlepších jedinců (v tomto případě nejlepších variant zákazů) sestavuje křížením a mutacemi další generaci, a to



tak dlouho, dokud se populace zlepšuje, tzn. dokud se zatím známé nejlepší řešení dále zlepšuje.

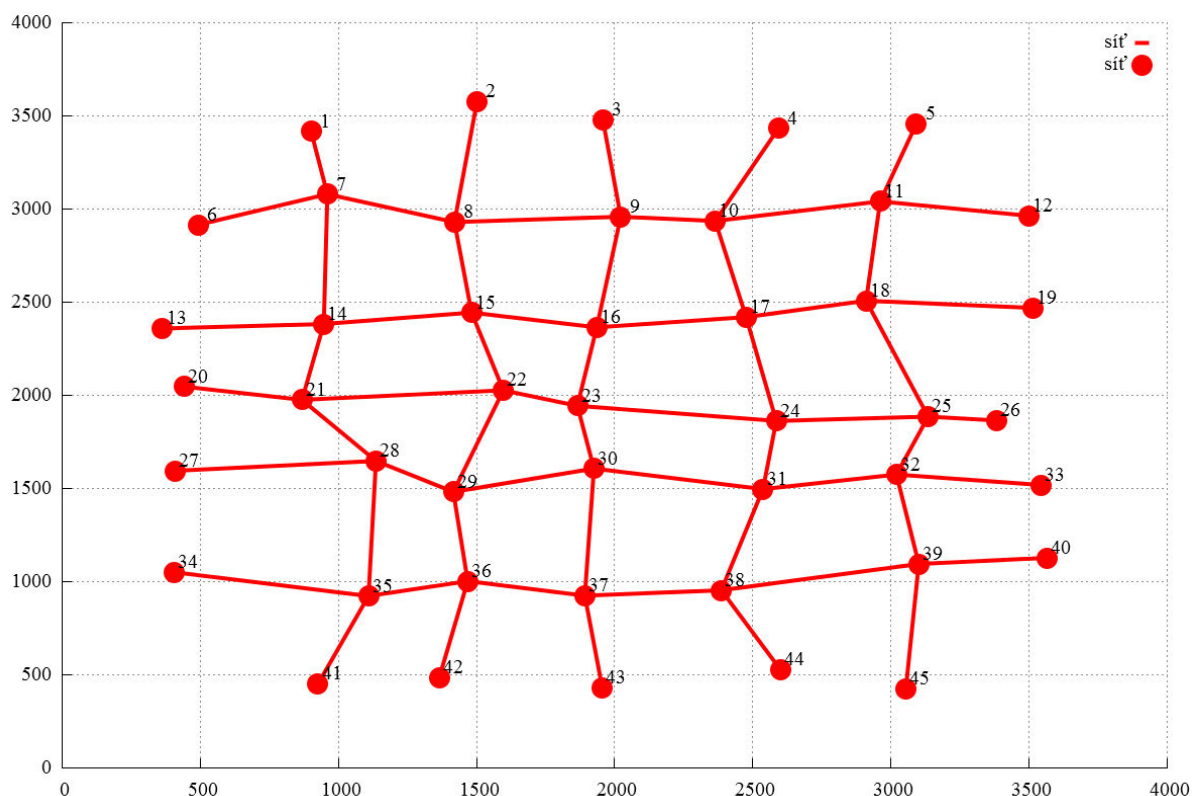
Princip genetického algoritmu vyžaduje, aby se celý výpočet odehrával v několika úrovních vnoření cyklů. V prvním cyklu se opakuje přidělování dopravního zatížení, až si svoji trasu najdou postupně všechna vozidla. Nejrychlejší trasa se hledá Dijkstrovým algoritmem, přičemž odpor sítě se počítá dle zatížení z předchozího cyklu. Druhý cyklus opakuje výpočet přidělení dopravního zatížení pro každé jedince, totiž pro každou variantu zákazů. Třetí cyklus opakuje výpočet všech jedinců jedné generace pro jednotlivé generace teoreticky tak dlouho, dokud se hledané řešení zlepšuje. Čtvrtý cyklus opakuje celý výpočet, tzn. celý genetický algoritmus pro náhodné dopravní sítě s náhodným zatížením.



Obr. 7-1. Optimalizační algoritmus.

## 7.1 Vytvoření sítě

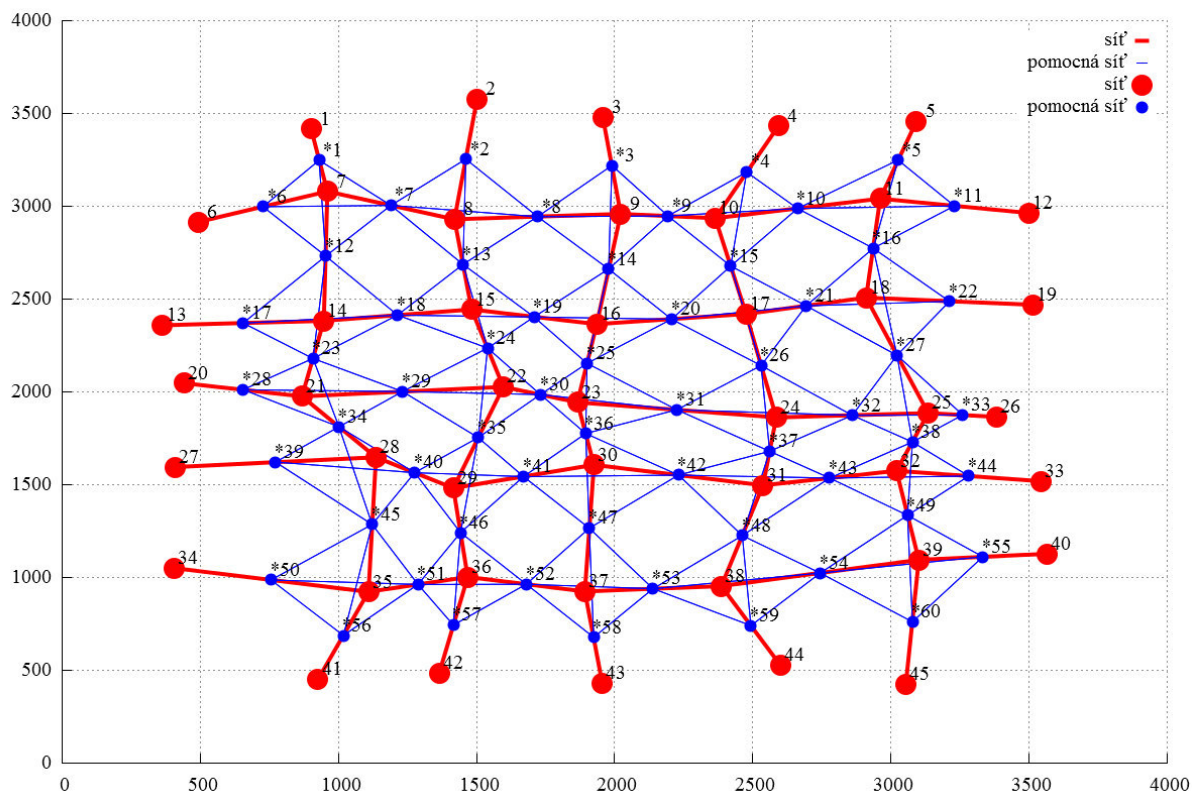
Pro potřeby vyzkoušení optimalizační úlohy byla navržena síť, která v sobě kombinuje prvky pravidelnosti (kvůli snazší algoritmizaci) a prvky nepravidelnosti (jako obraz většiny evropských měst). Proto byla zvolena čtvercová síť deformovaná náhodným posunutím uzlů. Rozsah sítě byl zvolen jako kompromis výpočtové náročnosti algoritmu a požadavku na složitou síť umožňující komplexní jevy (viz kap 2.1.2). Dopravní síť je tak tvořena 45 uzly, z nichž 25 vnitřních uzlů tvoří pole  $5 \times 5$  (křižovatky) a zbylých 20 vnějších uzlů tvoří obvod (vjezdy, resp. výjezdy ze sítě). Křižovatky jsou v rastrovém systému navzájem propojeny obousměrnými hranami. Uzly po obvodu jsou připojeny k nejbližší křižovatce. V souhrnu to znamená, že každá křižovatka má právě 4 ramena (tzn. jedná se o křižovatku průsečnou). Souřadnice uzlů  $x$  i  $y$  jsou v násobcích 500 metrů opravené o náhodný odstup plus/minus 150 m (rovnoměrné rozdělení odstupu). Souřadnice "z" sítě (nadmořská výška) nemá pro tuto úlohu význam.



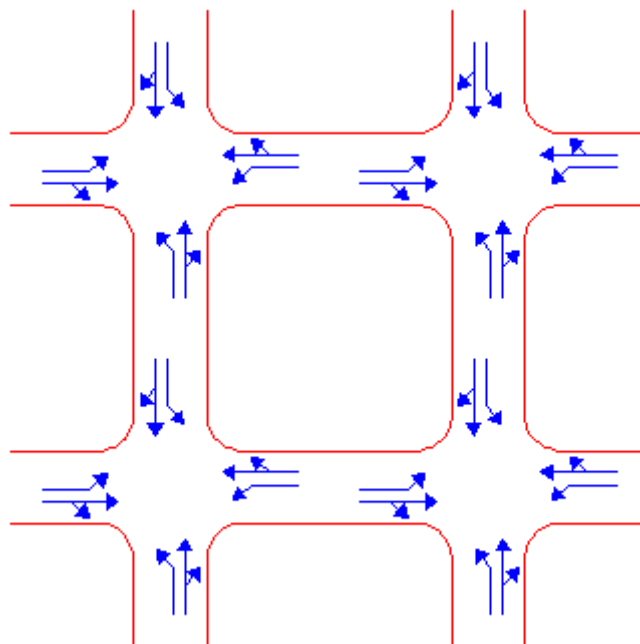
Obr. 7-2. Výchozí dopravní síť. Číslo  $u$  uzlů je číslem uzlu.

Optimalizace spojení mezi dvojicemi uzlů (Dijkstrův algoritmus) je závislá na ohodnocení hrany (doba jízdy, cena jízdy, délka jízdy). Jako rozhodující se ale předpokládá doba zdržení na křižovatkách (uzlech), nikoli na mezikřižovatkových úsecích (hranách) – proto je potřeba ohodnocovat také/především uzly. Proto je použita přesmyčka, kdy uzly jsou nahrazeny hranami a hrany jsou nahrazeny uzly.





Obr. 7-3. Výchozí dopravní síť (červěně) doplněna o pomocnou síť (modře), která vznikla prohozením uzlů a hran výchozí sítě. Číslo u uzlů je číslem uzlu (bez hvězdičky číslo uzlu hlavní sítě, s hvězdičkou číslo uzlu pomocné sítě).



Obr. 7-4. Převedení sítě dle obrázku 7-3 do reálné geometrie – červené hrany reprezentují komunikace, modré hrany reprezentují křižovatkové pohyby. Červené uzly reprezentují skutečné křižovatky, modré uzly jsou totožné s červenými hranami, tzn. jsou to skutečné komunikace.

Hrany sítě tak vytvoří uzly pomocné sítě a uzly sítě jsou nahrazeny hranami pomocné sítě. Dvojice nových uzlů je propojena dvojicí jednosměrných hran, které se na obrázku překrývají. Každá hrana pomocné sítě tak vlastně vytvoří jeden křižovatkový pohyb. Neupravený Dijkstrův algoritmus je tak možné použít pro hledání nejkratší cesty se zohledněním různé doby zdržení na křižovatce pro různé křižovatkové pohyby.

## 7.2 Matice dopravních vztahů

Dopravní zatížení se generuje čistě náhodně pro každou dvojici 60 uzlů pomocné sítě. Rozlišuje se, zda se jedná o cestu tam, nebo zpět, tzn., že uzly A a B tvoří dvojici  $A \rightarrow B$  a  $B \rightarrow A$ . Cesty  $A \rightarrow A$  nebo  $B \rightarrow B$  se nepředpokládají, protože nemají smysl. To ale, neznamená, že nemůže existovat zpáteční cesta. Ta by byla popsána jako dvě cesty:  $A \rightarrow B$  a  $B \rightarrow A$ , nebo  $B \rightarrow A$  a  $A \rightarrow B$ . Z obrázku 7-3 je patrné, že některé uzly pomocné sítě reprezentují hrany směřující ven ze sítě – díky tomu lze vygenerované cesty považovat za tranzitní, vnější i vnitřní. Přiřazování zatížení k hranám výchozí sítě reprezentuje výjezd vozidel z parkovacích stání, resp. z vjezdů ústících na komunikace – začínající a končící vozidla jsou tak do křižovatek připojena zcela přirozeně.

Celkový počet vozidel je součástí zadání – testování algoritmu probíhalo s různou zátěží v rozsahu 2 500 až 10 000 voz/hod v celé síti.

Z principu postupného zatížení sítě, viz níže, je žádoucí, aby počet vozidel pro dvojici zón byl dělitelný počtem kroků postupného zatížení, jinak by v jednotlivých krocích zatěžování byly přiřazované necelé počty vozidel, což je problém už z důvodu datového typu<sup>72</sup> - vzhledem k makroskopické povaze výpočtu by bylo možné necelé počty vozidel akceptovat. Proto se celkový počet jízd náhodně rozdělí jen mezi menší počet dvojic tak, aby intenzita dopravy v dané dvojici byla vždy rovna počtu iterací.

Nejdříve se vypočte počet dvojic uzlů, který bude zatížen:

$$PZD = PJ / PI \quad (7.1)$$

kde

$PZD$  je počet dvojic uzlů, kterým připadne intenzita číselně rovna počtu iterací  $PI$   
 $PI$  zvolený počet iterací  
 $PJ$  počet jízd

Dále je možné spočítat pravděpodobnost, na základě které se bude u každé dvojice uzlů losovat, zda bude zatížená.

$$P(D=ZD) = PZD / PD \quad (7.2)$$

kde

$PD$  je počet dvojic uzlů  
 $P(D=ZD)$  pravděpodobnost, že dvojice uzlů bude zatížená

Uvedený postup je možný jen, pokud  $P(D=ZD)$ , tedy pravděpodobnost, že dvojice uzlů je zatížená, je nejvýše rovna jedné. Jinými slovy, počet zatížených dvojic zón nemůže být větší

<sup>72</sup> Script kvůli rychlosti výpočtu používá datové typy Byte a Integer, které ukládají pouze celá čísla.

než celkový počet dvojic zón. V opačném případě by se na každou dvojici zón a iteraci nepřidělovalo 1 vozidlo, ale 2, resp. více vozidel.

		do					
		zóna 1	zóna 2	zóna 3	zóna 4	zóna 5	zóna 6
z	zóna 1		10 voz.	10 voz.	10 voz.	10 voz.	
	zóna 2	10 voz.			10 voz.	10 voz.	10 voz.
	zóna 3		10 voz.			10 voz.	
	zóna 4	10 voz.		10 voz.			10 voz.
	zóna 5	10 voz.	10 voz.	10 voz.			
	zóna 6	10 voz.		10 voz.	10 voz.	10 voz.	

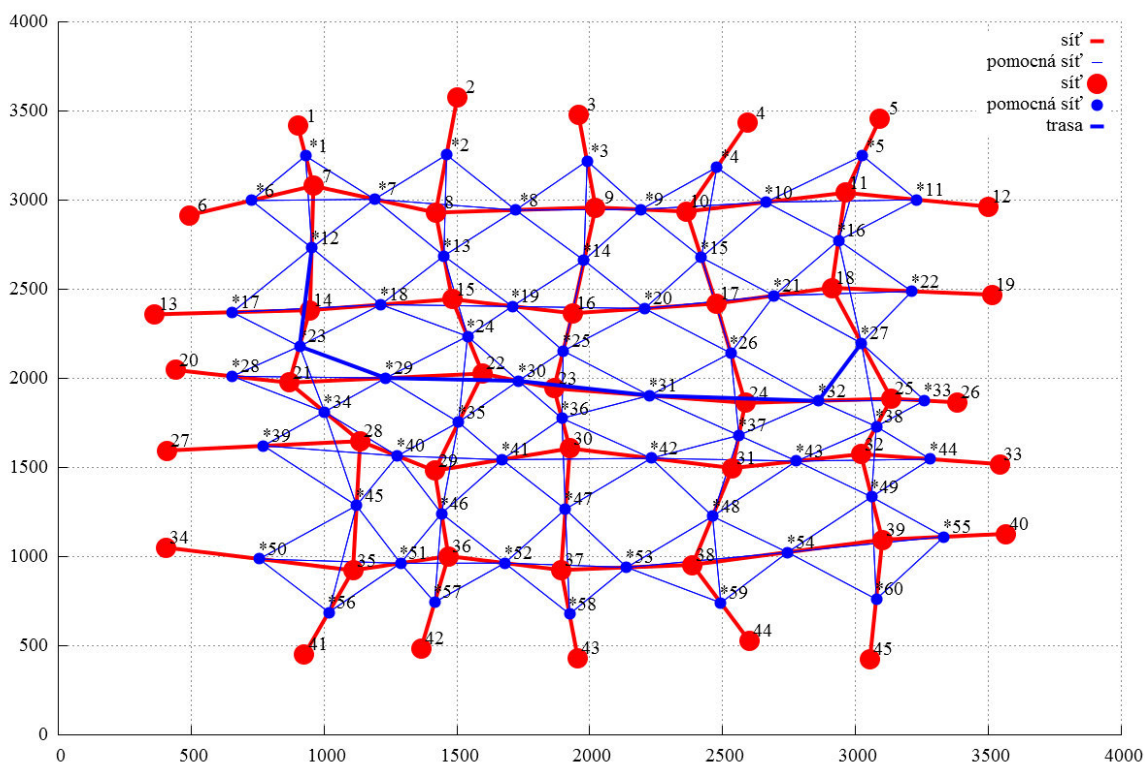
Tab. 7-5. Příklad rozdělení celkového (zadaného) počtu cest mezi menší počet dvojic uzlů tak, aby počet cest v jedné dvojici odpovídal počtu kroků postupného zatěžování. Zadáno je celkem 200 vozidel a 10 kroků postupného zatížení sítě, což znamená, že právě 20 dvojic zón může být zatíženo 10 vozidly. 20 zatížených dvojic zón z celkového počtu 30 existujících dvojic zón jsou 2/3 – při generování pseudonáhodného čísla v rozsahu 0 až 1 to znamená, že zátěž se přiřadí těm dvojicím, u kterých bude vylosováno číslo menší než 2/3.

### 7.3 Nalezení nejrychlejší cesty – Dijkstrův algoritmus

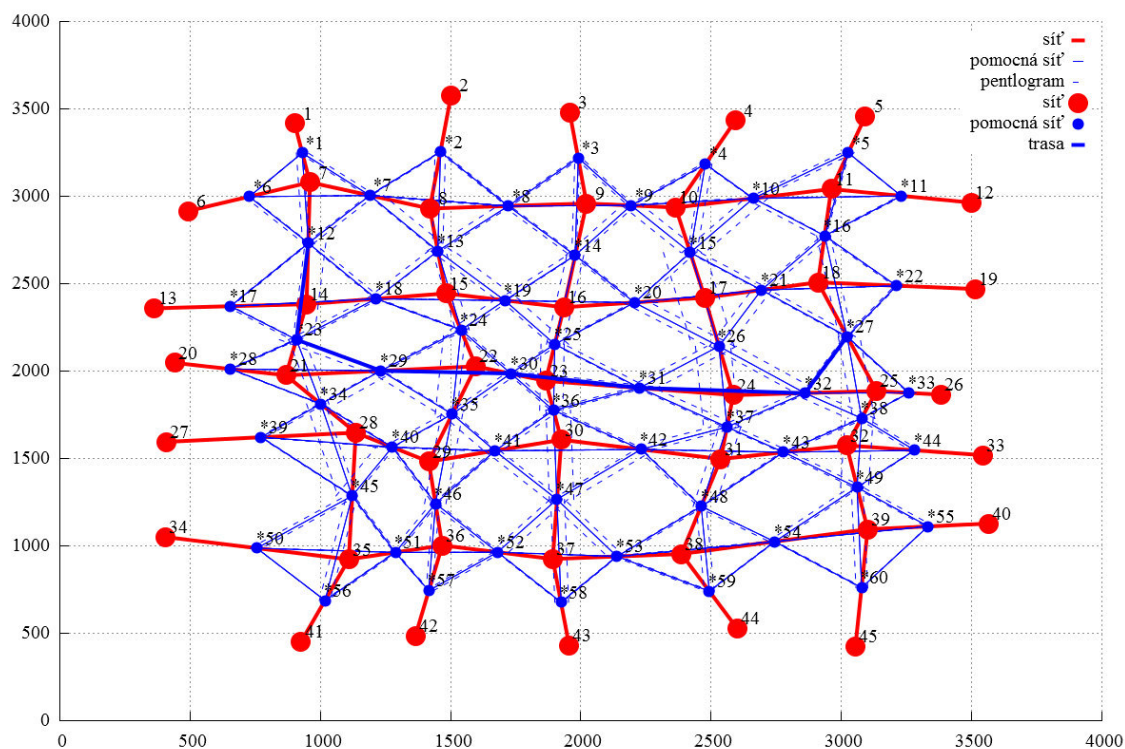
Pro každou dvojici uzlů se hledá nejrychlejší cesta využitím Dijkstrova algoritmu, a to zvlášť pro cestu tam, a zvlášť pro cestu zpět. Dijkstrův algoritmus se provádí na pomocné síti, tzn. zahrnuje dobu zdržení na křižovatkách odlišnou pro jednotlivé křižovatkové pohyby.

Jednotlivým hranám se následně přidělí intenzita jako součet dopravních vztahů mezi všemi dvojicemi uzlů, jejichž spojnice nalezená Dijkstrovým algoritmem vede přes inkriminované hrany.

Předpokladem použití Dijkstrova algoritmu je, že řidiči znají a použijí nejrychlejší trasu. Tento předpoklad se pro modely zatížení sítě běžně používá, přestože v praxi 100% neplatí (viz kap. 4.1.2.2). Zahrnutí požadavku na dělení zatížení na více tras a podle více kritérií do algoritmu principiálně zahrnout jde, pouze by bylo nahradit Dijkstrův algoritmus jiným, příp. opakovat Dijkstrův algoritmus s různým ohodnocením hran dopravní sítě. Tento problém ovšem částečně eliminuje postupné přidělování zátěže (viz dále), kdy se nejkratší trasa s postupným zatěžováním sítě může měnit.



Obr. 7-6. Výchozí dopravní síť (červeně) doplněna o pomocnou síť (modře), která vznikla prohozením uzlů a hran výchozí sítě. Číslo u uzlů je číslem uzlu. Tmavě modře vyznačena jedna z 3540 nejrychlejších cest v rámci sítě nalezená Dijkstrovým algoritmem.



Obr. 7-7. Obr. 7-6 doplněný o pentogram zatížení jednotlivých hran.

## 7.4 Postupné přidělování dopravní zatížení

Zvolena byla metoda postupného zatěžování dopravní sítě. První vozidla si najdou nejkratší cestu po nezatížené síti, tzn. kdy odpor jednotlivých hran je tvořen pouze dobou jízdy 50km rychlostí, jinými slovy, kdy je odpor přímo úměrný délce hran sítě. Další vozidla hledají nejkratší cestu po síti zatížené předchozími vozidly (viz další kapitola) – vynechávají již přetížené křižovatky. Tento cyklus se opakuje, dokud nejsou na síť přidělena všechna vozidla. Počet kroků postupného zatěžování byl s ohledem na dobu výpočtu zvolen 10.

Jinou metodou by bylo přidělení všech vozidel na nezatíženou síť a výpočet doby zdržení. V druhém kroku se opět přidělí všechna vozidla, ale na síť, kde mají hrany odpor zahrnující dobu zdržení spočítanou v předchozím kroku. Takto se algoritmus opakuje tak dlouho, dokud se vracejí rozdílné výsledky (rozdíl je menší než stanovená mez). Tento postup může ale divergovat, tzn. nepřibližovat výsledky jednotlivých iterací k sobě, ale naopak střídat dvě opačné hodnoty. Právě k tomu jevu při nastalé konfiguraci algoritmu dochází, a to protože 1) při překročení kapacity je nutno nastavit prohibitivní sazbu a 2) vozidla hledají pouze jednu trasu a to tu nejkratší – ve výsledku pak nastává kmitání mezi dvěma polohami, kdy intenzita překročí kapacitu jedné skupiny křižovatkových pohybů, následkem čehož se v příští iteraci přesunou na jinou skupinu pohybů, tu zahltí a způsobí přesun v dalším kole zpět a pořád dokola.

## 7.5 Křižovatky

Vždy dvanáct hran pomocné sítě obklopujících jeden uzel výchozí sítě reprezentuje dvanáct křižovatkových pohybů. Obecné uspořádání se předpokládá dle obrázku 7-8 – společný řadič pro směr rovno a přímo a samostatný řadič pro směr vlevo. Ovlivnění pěší, cyklistickou ani veřejnou dopravou se explicitně neuvažuje, což tyto módy dopravy nevylučuje, pouze to znamená, že jejich signální plán bude podřízen signálnímu plánu pro motorová vozidla.

### 7.5.1 Zakázaná odbočení

Dle vztahu 6.5 je na každé křižovatce 16 variant zákazů levých odbočení. Při počtu 25 křižovatek to dle vztahu 6.6 činí  $16^{25}$ , tj.  $1,26 * 10^{30}$  variant zákazů levých odbočení v celé síti.

Zákaz se realizuje nulovou délkou zelené pro zakázaný pohyb a následné nulové kapacity. Za dobu zdržení se dosazuje prohibitivní sazba 5000 s – při hledání nejkratší cesty Dijkstrovým algoritmem pak tato nemůže "vyhrát".

### 7.5.2 Návrh signálního plánu

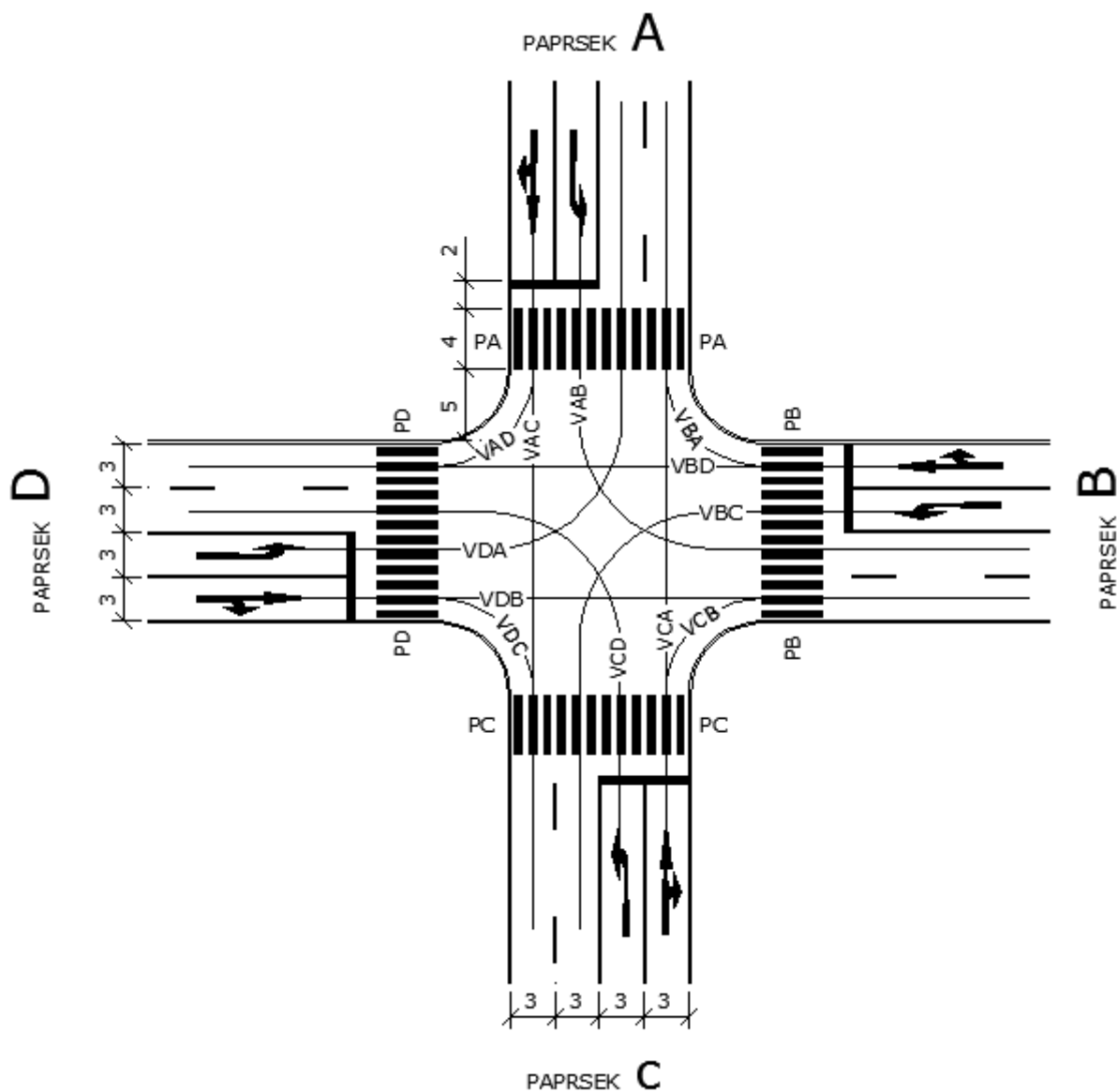
Pro každou křižovátku každé varianty a každého kroku zatížení je nutno automaticky navrhnout signální plán. Vzhledem k charakteru použitého dopravního zatížení, které se v čase nemění, není možno a nutno navrhovat dynamické řízení. Nepravidelné délky hran znemožňují zavést v síti plošnou koordinaci, proto jsou signální plány pro jednotlivé křižovatky navrhovány izolovaně. Základní parametry pro všechny křižovatky jsou následující:

- Zvolená doba cyklu – 80 sekund
- Mezičas
  - vozidla-vozidla – 4 sekundy (dle výpočtu v příloze B)
  - vozidla-chodci – 7 sekund (dle výpočtu v příloze B)
- levé odbočení je řešeno jako nekolizní

Cyklus lze v našem případě rozdělit do fází několika způsoby:

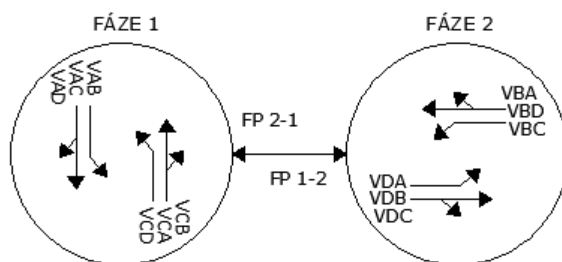


- dvě fáze s kolizními odbočeními vlevo (nesplňuje předpoklad nekolizního odbočení)
  - čtyři fáze, z toho dvě fáze pro protisměrná levá odbočení
  - čtyři fáze, každá fáze pro jeden vjezd
- šest fází, dvě základní fáze pro jízdu přímo doplněny o čtyři fáze pro jednotlivá levá odbočení

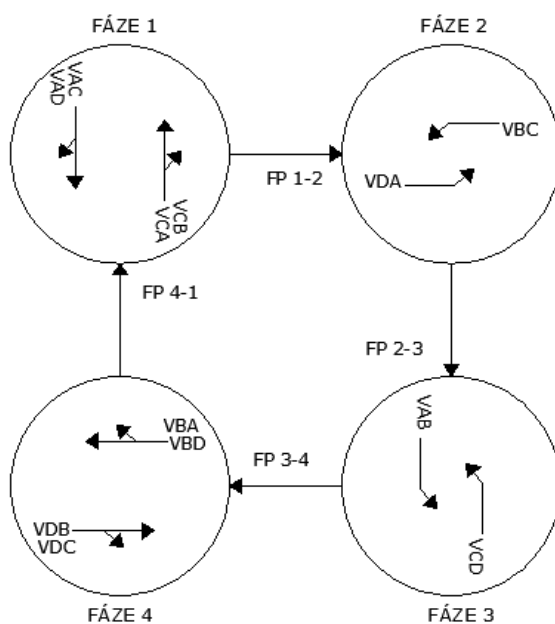


Obr. 7-8. Obecná průsečná křižovatka uvažovaná při běhu algoritmu. Číslování křižovatkových pohybů odpovídá TP 188.

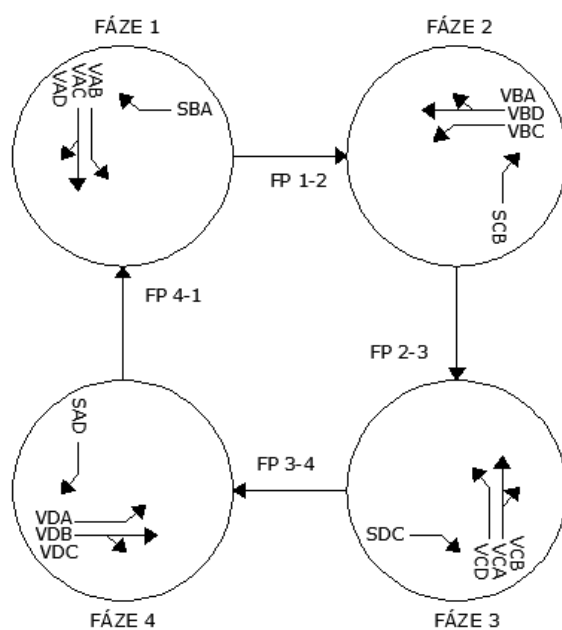




Obr. 7-9. Schéma fází: Dvě fáze s kolizními odbočením vlevo.



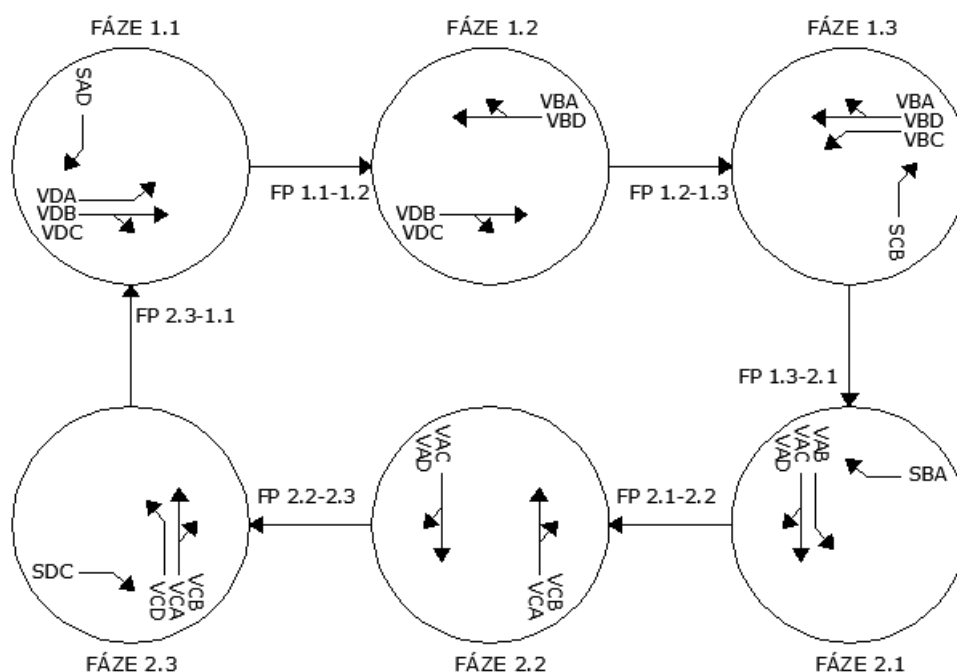
Obr. 7-10. Schéma fází: Čtyři fáze, z toho dvě fáze pro jednotlivá levá odbočení.



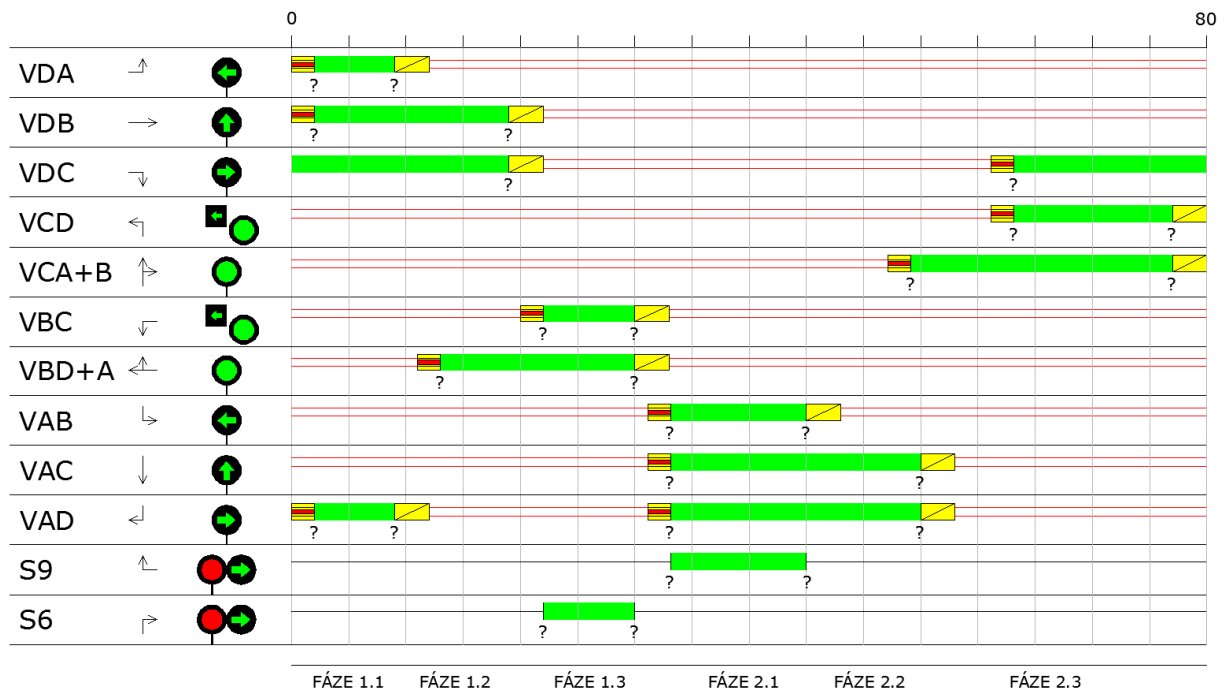
Obr. 7-11. Schéma fází: Čtyři fáze, každá fáze pro jeden vjezd.

Poslední z uvedených schémat má oproti ostatním výhodu v možnosti vyřadit kteroukoli ze čtyřech fází odpovídajících čtyřem levým odbočením. Celkově tak lze z tohoto schématu vytvořit 16 dalších schémat odpovídajících 16 konfiguracím zákazu levého odbočení. Tento postup lze algoritmovat, tedy automatizovat.

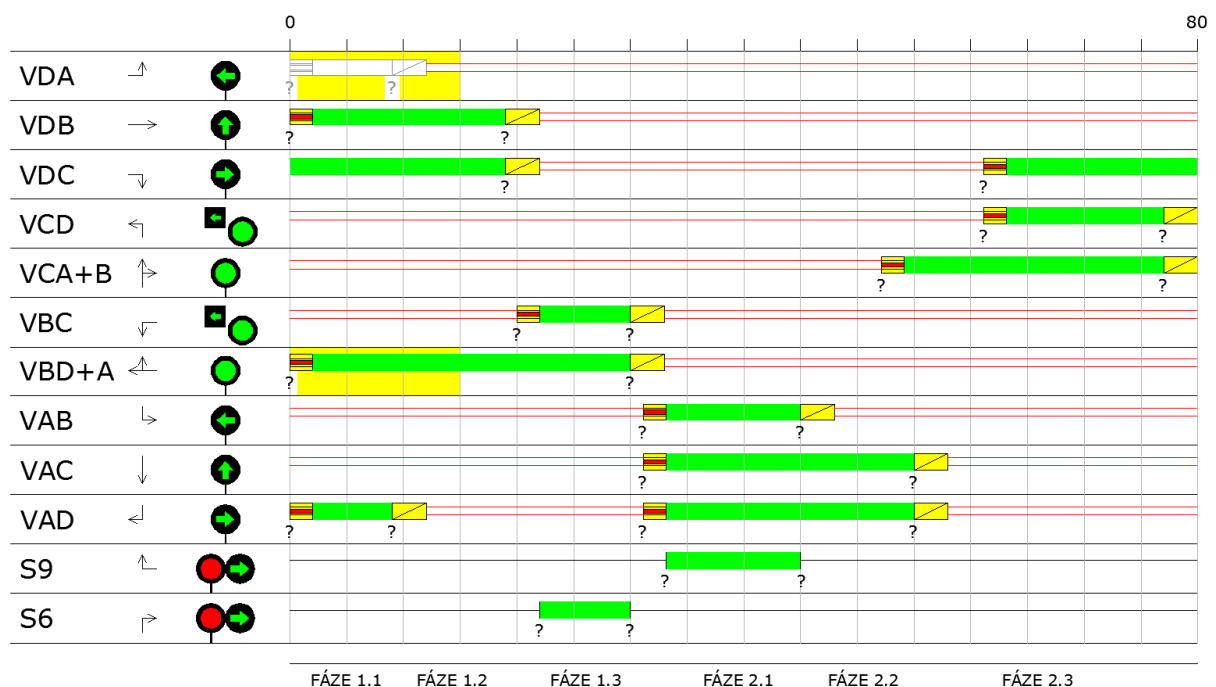
Šest fází lze rozdělit na dvě hlavní fáze, které obě mají tři podfáze – v tomto smyslu je také použito jejich označení. Fáze #.1 (1.1 nebo 2.1) a #.3 (1.3 nebo 2.3) jsou v podstatě prodloužením fází #.2 (1.2 nebo 2.2), kdy se povoluje levé odbočení na úkor ukončeného protisměru. V době povoleného nekolizního levého odbočení lze realizovat pravé odbočení, které ale nemá svůj řídicí pruh, tzn. je využitelné jen pokud v něm nestojí vozidlo jedoucí přímo a proto s ním nebude při kapacitním posudku uvažováno. Kvůli nemožnosti ukončit vyklizovací šipku v době zeleného signálu je nutno pro dva paprsky použít směrové signály – tam, kde to možné je, je využito vyklizovací a doplňkové šipky, což ale nemá na algoritmus žádný vliv.



Obr. 8-2. Schéma 6 fází platné při povolení všech levých odbočení.



Obr. 7-12. Obecný signální plán. Pro jednotlivé signální skupiny jsou zobrazeny i použité signály – plný signál, plný signál s vyklizovací šipkou, plný signál s doplňkovou šipkou a směrový signál.



Obr. 7-13. Signální plán při zákazu křižovatkového pohybu č. 1. O jeho dobu zelené a dobu jednoho mezičasu je prodloužena signální skupina protisměrných pohybů č. 8 a 9.

Doby zelených jsou rozděleny v poměru intenzit, a to nejprve pro hlavní fáze a poté pro podfáze. Intenzita je předtím přepočtena na jeden řadičový pruh. Obecně zapsáno:

$$\frac{\frac{I_1}{PP_1}}{\frac{I_2}{PP_2}} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (7.3)$$

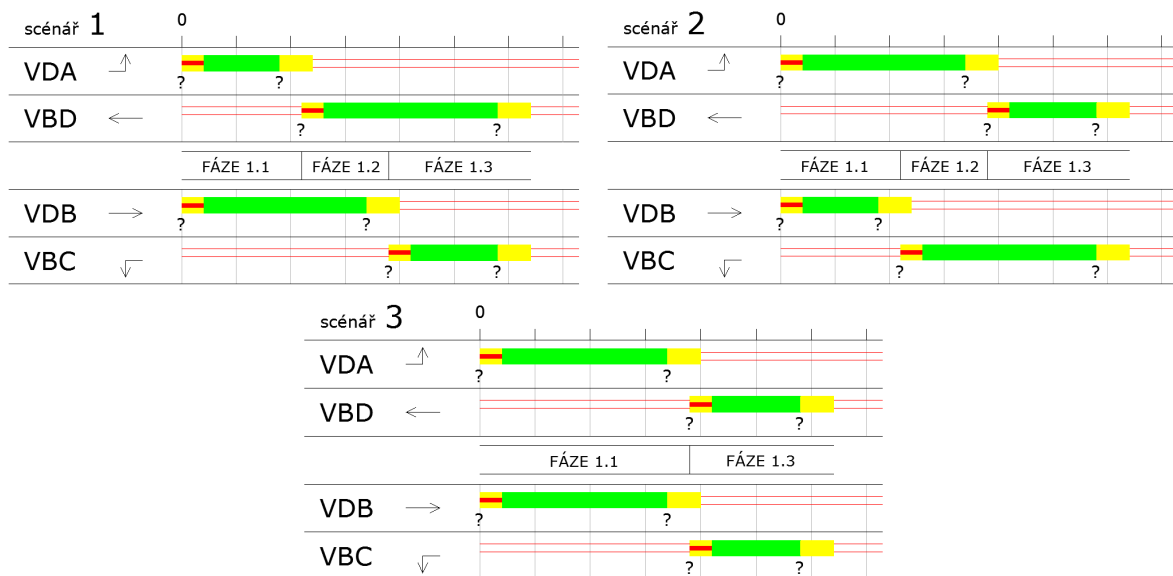
kde

$I_1$  ( $I_2$ ) je intenzita ve směrech 1 (2)  
 $PP_1$  ( $PP_2$ ) počet řadicích pruhů ve směrech 1 (2)  
 $Z_1$  ( $Z_2$ ) doba zelené ve směrech 1 (2)

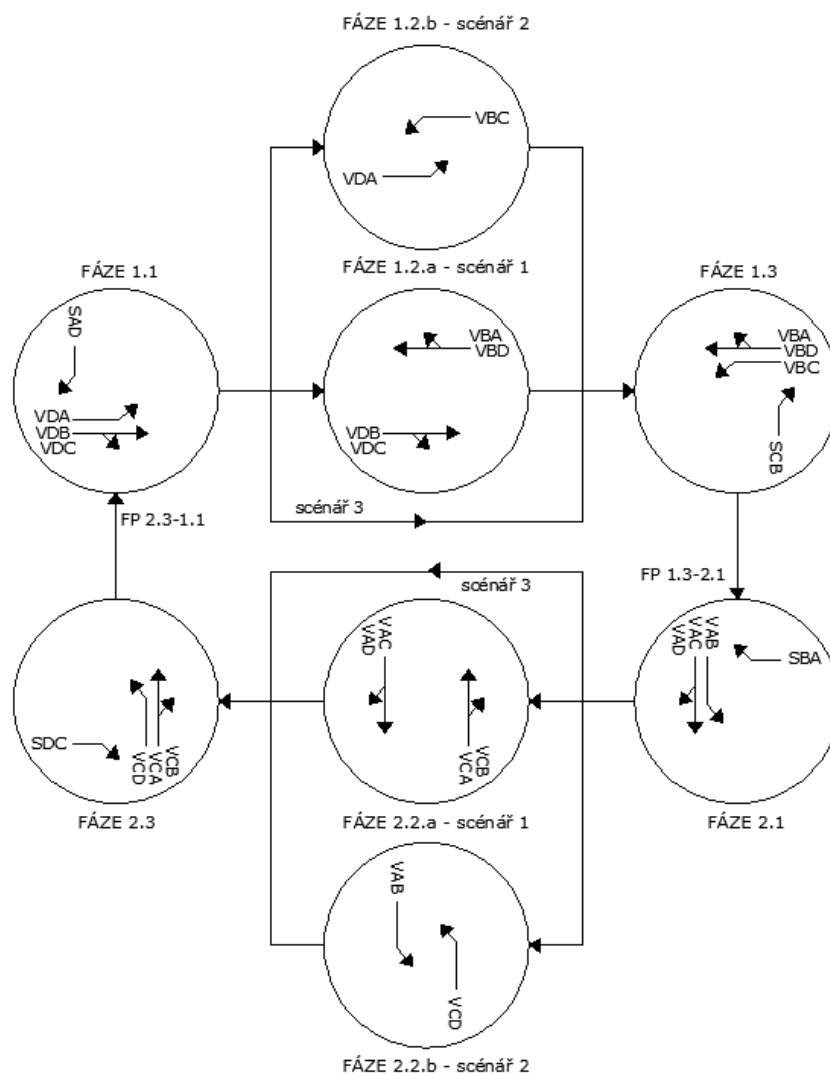
Dělba mezi hlavní fáze je zřejmá: Jeden směr (označme 1) zahrnuje vjezdy VB a VD, druhý vjezd (označme 2) zahrnuje vjezdy VA a VC. Dělba mezi podfáze je o něco složitější a je prováděna čtyřikrát:

1. dělba: Vjezdy VBA a VBD oproti vjezdu VDA (v rámci hlavní fáze 1)
2. dělba: Vjezd VBC oproti vjezdům VDB a VDC (v rámci hlavní fáze 1)
3. dělba: Vjezdy VAC a VAD oproti vjezdu VCD (v rámci hlavní fáze 2)
4. dělba: Vjezd VAB oproti vjezdům VCA a VCD (v rámci hlavní fáze 2)

Každá hlavní fáze se rozděluje nadvakrát – tím se všem vjezdům (řadicím pruhům) přidělí doba zelené přesně odpovídající jejich podílu na intenzitě. Na konkrétním poměru intenzit pak záleží, zda se překryjí doby zelených pro jízdy přímo a vpravo a podfáze #.2 tak bude zahrnovat vzájemně nekolizní jízdy přímo a vpravo podle obr. 7-14 (scénář 1), nebo zda se překryjí doby zelených pro jízdy vlevo a podfáze #.2 tak bude zahrnovat vzájemně nekolizní jízdy vlevo podle obr. 7-14 (scénář 2). Blíží-li se k sobě doby zelené vjezdů ze stejného pruhu, tak doba podfáze #.2 se blíží nule (obr. 7-14, scénář 3). Výřezy signálního plánu pro uvedené tři scénáře jsou na obr. 7-14, na obr. 7-15 je schéma fází respektující uvedené scénáře.



Obr. 7-15. Výřez ze signálního plánu – dělení doby zelené mezi dvojice kolizních pohybů – ve scénáři 1 převažuje intenzita přímých směrů a pravých odbočení, ve scénáři 2 převažuje intenzita levých odbočení, ve scénáři 3 jsou intenzity v obou řadicích pružích stejného vjezdu stejné.



Obr. 7-15. Univerzální schéma fází použité v algoritmu pro návrh signálního plánu

Doby zelených jsou opraveny tak, aby činily nejméně 5 s, což je minimální doporučená doba zelená dle TP 81.

Pro první kolo – rozdělení doby zelené pro hlavní fáze

$$Z_{F,1} = \min \left( \max \left( \begin{array}{l} I_{F,1} \frac{C - P_M M}{I_{F,1} + I_{F,2}} \\ 10 \\ C - P_M M - 10 \end{array} \right) \right) \quad (7.4)$$

$$Z_{F,2} = C - P_M M - Z_1 \quad (7.5)$$

kde

$Z_{F,1}$  ( $Z_{F,2}$ ) je doba zelené pro fází 1 (2) [s]

- $I_{F,1}$  ( $I_{F,2}$ ) součet intenzit ve směrech zařazených do fáze 1 (2) [voz/h]  
 $C$  doba cyklu (stanovena na 80 s) pro 1. kolo, resp. fáze pro 2. kolo [s]  
 $M$  doba mezičasu (stanovena na 3 s) [s]  
 $P_M$  počet mezičasů v celém cyklu (4, viz obr. 7-15)

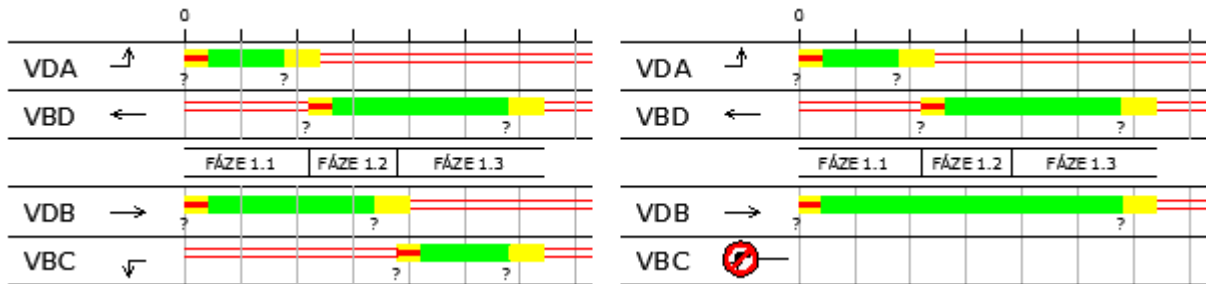
Pro druhé kolo – rozdělení doby zelené hlavní fáze mezi kolizní pohyby podfáze

$$Z_1 = \min \left( \max \left( \begin{array}{l} \frac{I_1}{PP_1} \frac{Z_F}{I_1 + I_2} \\ 5 \\ Z_F - 5 \end{array} \right) \right) \quad (7.6)$$

$$Z_2 = Z_F - Z_1 \quad (7.7)$$

- kde  
 $Z_1$  ( $Z_2$ ) je doba zelené pro směry 1 (2) [s]  
 $I_1$  ( $I_2$ ) součet intenzit ve směrech 1 (2) [voz/h]  
 $PP_1$  ( $PP_2$ ) počet pruhů ve směru 1 (2)  
 $Z_F$  doba fáze [s]

V případě, že některé levé odbočení je zakázáno, resp. některá levá odbočení jsou zakázána, tak doba zelené přechází zcela na kolizní křižovatkový pohyb. Princip je tedy zachován – v zakázaném směru je nulová intenzita, resp. nulový podíl na celkovém zatížení, tzn. nulový podíl na době zelené. Uplatňována ale není podmínka minimální doby zelené (pro zakázané odbočení).



Obr. 7-16. Výřez ze signálního plánu porovnávající stav, kdy není (vlevo) a je (vpravo) zakázáno levé odbočení ozn. VBC. Při zákazu levého odbočení VBC připadne celá doba zelené fáze 1 (tzn. 1.1+1.2+1.3) koliznímu vjezdu VDB a zároveň VDC.

Pro potřeby Dijkstrova algoritmu a hledání trasy nejmenšího odporu se zakázanému odbočení přiřazuje prohibitivní sazba 300 s.

### 7.5.3 Výpočet kapacity a doby zdržení

Pro každý vjezd se v duchu TP 235 vypočte kapacita jednotlivých vjezdů a poté výpočet střední doby zdržení. Vjezdem se zde rozumí jeden řídicí pruh. Je-li zakázáno levé odbočení, tak v protisměru je uspořádání pravý pruh pro jízdu vpravo a přímo a levý pruh pro jízdu přímo. Tato dvojice pruhů je potom považována za jeden vjezd.



Při určení saturovaného toku se vychází z předpokladů, že:

- sklon nivelety je nulový a následně koeficient sklonu  $k_{skl}$  roven 1,00.
- pro levá odbočení se uvažuje s poloměrem 17,5 m a stoprocentním podílem odbočujících vozidel (levé odbočení má samostatný vjezd – řadící pruh), čemuž odpovídá  $k_{obl}$  0,92. Přecházející chodci se neuvažují, neboť levé odbočení se předpokládá převážně nekolizní.
- pro pravá odbočení se uvažuje s fiktivním poloměrem 2,5 m, což odpovídá 500 přecházejícím chodcům za hodinu, tedy zatížení v polovině rozpětí, se kterým uvažuje tabulka v TP 235. Skutečná hodnota poloměru je dle situace vzorové křižovatky 6,5 m. Podíl odbočujících vozidel se počítá pro každou křižovatku zvlášť.

Je-li kapacita křižovatky překročena, nelze výpočet doby zdržení použít přidělí se prohibivní sazba doby zdržení 300 s, která odradí další řidiče (z následujících přírůstků zatížení) od použití této již přetížené křižovatky<sup>73</sup>. Není-li kapacita křižovatky překročena, dojde k výpočtu doby zdržení dle TP 235. Všechny vstupy pro tento výpočet jsou již známé, efektivní doba zelené je zjednodušeně a na stranu bezpečnou uvažována v totožné výši jako doba zelené. Doba zelené doplňkových šipek vpravo se neuvažuje, neboť při uvažovaném tvaru pravé odbočení má společný řadící pruh s pruhem pro jízdu přímo.

Při optimalizaci konkrétní dopravní sítě by se uvedené parametry zadaly v hodnotám odpovídajícím konkrétním křižovatkám.

Cestovní doba, tzn. odpor hrany pro běh Dijkstrova algoritmu v dalším kroku postupného zatěžování sítě, je vypočtena jako doba zdržení způsobená křižovatkou dle postupu v předchozích odstavcích plus doba, za kterou je možno ujet vzdálenost od předchozí křižovatky rychlostí 50 km/h. Tento postup vychází z předpokladu, že limitujícím prvkem sítě je uzel (křižovatka), nikoli hrana (mezikřižovatkový úsek).

## 7.6 Hodnocení použitého modelu

Model hledání nejkratší trasy, tak jak vytvořen, není možno kalibrovat, protože neobsahuje žádné parametry, které by bylo možno měnit na základě znalosti reálného chování. Hledána je právě nejrychlejší trasa. Výjimkou z uvedeného může být počet kroků postupného zatěžování sítě, které může ovlivnit míru využití alternativních tras. Výpočet doby zdržení byl převzat z TP 235, o kterých lze předpokládat, že byly svými autory řádně zkalibrovány a zvalidovány.

Zkušenosti z tvorbou vlastního modelu dle postupu nahoře ukazují, že jeho použití je možné, ovšem je otázka, zda je vhodné. Pro tento výzkumný úkol je přínosné odstranění tzv. černé skříňky tvorbou vlastního algoritmu a následně vlastního skriptu. Pro řešení reálného úkolu se jako vhodnější jeví využít dlouhodobě vytvářených produktů, jakým je třeba Matsim a které pochopitelně disponují výrazně většími možnostmi než ad hoc vytvořený skript. V praxi by to znamenalo volání produktu (např. Matsimu) optimalizačním algoritmem se zadáním uspořádání sítě a s dotazem na dobu zdržení, resp. jiné optimalizační kritérium.

## 7.7 Optimalizace – genetický algoritmus

Použitou metodou optimalizace je genetický algoritmus. Jedince představují varianty zákazů odbočení, přičemž jednotlivými geny jsou jednotlivé dvojice protisměrných křižovatk-

<sup>73</sup> TP 235 doporučuje při překročení kapacity použít fiktivní dobu 120 s – pro potřeby postupného zatížení sítě je ale příliš malá, protože řidiči by přetíženou křižovatkou vyhledávali i v dalších krocích postupného zatěžování.

vých pohybů – hodnoty genů (alely) mohou nabírat hodnotu 0 (oba pohyby povoleny), 1 (levé odbočení zakázáno) nebo 2 (pravé odbočení a jízda přímo zakázány – nakonec použito jen v prvotním testování).

Nultá generace vzniká náhodně – pravděpodobnost alely č. 0 je zvolena 1/15, č. 1 je 13/15 a č. 2 je 1/15. Uvedené pravděpodobnosti byly zvoleny vzhledem k tomu, že při zkušebním nastavení samých nul, jedniček a dvojek vyšla nejlépe varianta s jedničkami. Tito tři nestandardní jedinci jsou v nulté generaci ponechání, tzn. náhodných je zbylých 57 jedinců.

Nová generace vzniká kombinací prosté reprodukce, křížení a mutace. Dvojice rodičů má vždy dva potomky.

Dvojice rodičů z množiny jedinců se vybírá náhodně se zohledněním fitness, což je součet cestovních dob všech vozidel (menší hodnota je lepší). Postupuje se od nejlepšího k nejhoršímu jedinci a u každého jedince se losuje – je-li náhodné číslo (0 až 1) menší než  $\alpha$ , hledání rodiče se zastaví.

Pořadí	Jedinci										
	1	2	3	4	5	6	7	8	...	60	61
Fitness	1875	1890	1920	1952	2010	2068	2160	2205	...	3560	3800
Náhodné číslo	$> \alpha$	$> \alpha$	$> \alpha$	$> \alpha$	$< \alpha$						
vybraný rodič	ne	ne	ne	ne	<b>ano</b>						

Tab. 7-17. Příklad hledání rodiče. Losování začíná u jedince s fitness 1875 a k dalšímu jedinci se přesouvá tak dlouho, dokud nepadne číslo menší než  $\alpha$ .

Poté se losuje, zda se provede křížení, nebo prostá reprodukce. Při náhodném čísle větším než  $\beta$  se provádí uniformní křížení, tzn. pro každý gen se losuje, zda se prohodí. Pravděpodobnost prosté reprodukce se zvyšuje tím, že algoritmus hledání rodičů může vybrat stejného otce i matku, kdy výsledek křížení je stejný jako prosté reprodukce.

Po křížení nebo prosté reprodukci, kdy se u každého genu jedince nové generace losuje, zda nemá dojít k přiřazení náhodné alely. Pravděpodobnost přiřazení konkrétní alely je stejná jako u nulté generace.

## 7.8 Výsledek optimalizačního algoritmu

V tabulce 7-18 je ukázka výsledku optimalizačního algoritmu popsána v předchozích odstavcích. Parametry sítě byly zvoleny:

- dopravní zatížení celé sítě 2 500 voz/h
- rozsah sítě 25 průsečných křižovatek
- vzdálenost křižovatek  $500 \pm 150$  m
- rychlost mezi křižovatkami 50 km/hod

Pro kalibraci genetického algoritmu bylo na základě průběžných pokusů zvoleno  $\alpha = 0,1$  a  $\beta = 0,1$ . Zadáno bylo 7 simulací vždy s 60 jedinci po dobu 20 generací.

generace	simulace						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1219	1303	1363	1192	928	1533	1025
2	1217	1328	1353	1179	928	1537	1016
3	1191	1317	1323	1169	928	1537	1016

4	1191	1323	1350	1169	928	1444	1014
5	1187	1321	1312	1162	926	1402	1014
6	1187	1323	1306	1162	924	1396	1014
7	1187	1321	1306	1157	924	1396	1014
8	1187	1323	1299	1155	919	1388	1016
9	1187	1323	1299	1155	921	1388	1014
10	1187	1323	1293	1155	921	1379	1014
11	1187	1323	1293	1155	919	1379	1016
12	1187	1323	1293	1155	919	1379	1014
13	1187	1323	1295	1155	921	1379	1014
14	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
15	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
16	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
17	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
18	1187	1323	1295	1155	919	1379	1014
19	1187	1323	1295	1155	921	1379	1014
20	1187	1323	1295	1155	921	1379	1014
pokles	-3%	2%	-5%	-3%	-1%	-10%	-1%
vše zakázáno	2730	2767	2288	2002	1556	2862	2382
vše povoleno	1333	1493	1491	1306	942	1572	1025

*Tab. 7-18. Ukázka výsledku běhu optimalizačního algoritmu. Provedeno bylo sedm simulací, každá s dvaceti generacemi. Uvedena jsou vždy fitness nejlepšího jedince dané generace, tzn. nejkratší celková cestovní doba [hod.] z posuzovaných uspořádání. Na spodních řádcích je ještě uvedeno zkrácení celkové cestovní doby a cestovní doba ve variantách „vše povoleno“ a „vše zakázáno“.*

Je patrné, že v tomto příkladě dojde při jedné ze simulací ke snížení celkové cestovní doby (tj. nikoli pouze doby zdržení) o 10 %. Tento výsledek pochopitelně nelze paušalizovat, neboť vždy bude záležet na konkrétních parametrech optimalizované dopravní sítě. Z tabulky 7-18 je vidět, že nejlepšího zlepšení bylo dosaženo při největší výchozí cestovní době, tzn. při nejhustší dopravě – to je logické, neboť nejsou-li křižovatky nadměrně vytíženy, nedochází na nich k zdržení odstranitelnému zakázáním některého z odbočení.

Je zajímavé, že na tomto i jiných pokusech prováděných s optimalizačním algoritmem se projevuje, že varianta „vše povoleno“ (žádná zakázaná odbočení) je dobrá, zatímco varianta „vše zakázáno“ (zakázána všechna levá odbočení) je špatná. Vždy se ale najde varianta lepší než „vše povoleno“, tzn. samotné hledání nejlepšího uspořádání levých odbočení se vyplatí.

Výpočet příkladu (7 simulací, 20 generací s 60 jedinci) běžel na běžném kancelářském počítači přibližně 8 hodin. Toto je v současné době výrazné omezení, neboť omezuje rozsah úloh jak co se týče pokusů s různými nastaveními algoritmu.

## 8 ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Cílem této práce bylo navrhnout **Algoritmus pro hledání nejlepší konfigurace dopravní sítě**, tzn. pro **optimalizaci dopravní sítě**. Důvodem snahy o návrh tohoto algoritmu byla komplexnost dopravní sítě, kdy při možnosti volby trasy uživatelem není možné jednoduše stanovit dopad plánovaného opatření na křehkou rovnováhu mezi dopravním zatížením a plynulostí dopravy, neboť oba tyto faktory se vzájemně ovlivňují. Výpočet rovnovážného stavu je znám a provádí se pomocí strategického modelu dopravní sítě, jehož postupný nebo iterační běh dokáže prognózovat chování uživatelů dopravní sítě ve vztahu k reálné, tzn. omezené kapacitě dopravní sítě. Na dopravní síti lze realizovat nepřeberné množství opatření v ještě větším počtu variant. Stávající intuitivní hledání optimální varianty zkoušením různých opatření a modelováním jejich dopadu je zdlouhavé a o nalezení skutečně optimálního řešení ze všech možných variant, nikoli jen těch zvolených k posouzení, je možné dost dobře pochybovat. Nabízí se tak otázka, zda lze proces optimalizace učinit systémovějším a zároveň ještě i lépe plně automatickým. Právě systematické a zároveň automatické hledání optimální konfigurace dopravní sítě bylo předmětem algoritmu, který je spolu s východiskem ke své tvorbě popsán v předchozích kapitolách.

Obecnými požadavky pro použití navrženého algoritmu bez ohledu na konkrétní úlohu a konkrétní dopravní síť jsou:

- schopnost definovat optimalizační kritérium, tzn. stanovit, která z variant je nejlepší;
- schopnost navrhovat všechny reálně možné varianty a navrhovat je automaticky, tzn. jen s použitím univerzální šablony;
- schopnost všechny varianty ohodnotit z hlediska dopadu na dopravní síť.

Jsou-li uvedené podmínky splněny, tak již stačí aplikovat vhodnou optimalizační metodu, kterou byl v této práci zvolen genetický algoritmus.

Z celé řady opatření na celé řadě různých dopravních sítí byla vybrána jedna úloha, na které byl navržený algoritmus otestován. Bylo to levé odbočení, které na křižovatkách pozemních komunikací působí větší či menší problémy. Proto je také běžně omezováno, přičemž zákaz odbočení způsobí nutnost jistému počtu vozidel změnit trasu, čímž se spolu se změnou doby zdržení na křižovatce se zakázaným odbočením změní dosavadní odpor jednotlivých prvků silniční sítě a dojde k menšímu či většímu přerozdělení dopravní zátěže. Na každé křižovatce jsou čtyři levá odbočení, což dělá šestnáct variant jen na jediné křižovatce. Při uvažování zákazů na všech křižovatkách dochází k růstu počtu variant do astronomických hodnot – v modelovém případě s dvaceti pěti křižovatkami se počet variant dostává do řádu deset na třicátou. Velké množství variant znemožňuje prosté vypočtení všech variant a jejich následné seřazení od nejlepší – nezbytné je použít sofistikovanější optimalizační metodu. Ta je zkomplikována nutností počítat jednotlivé varianty strategickým dopravním modelem.

Vlastní optimalizace probíhá pomocí genetického algoritmu, tj. postupu, který stejně jako v přírodě nechává přežít nejsilnějším-nejlepším jedincům-variantám. Tato metoda je heuristická, tzn. nabízí nám řešení, o kterém nelze s jistotou říct, zda je skutečně nejlepší, ani se nedá říct, jak moc je nalezené řešení vzdáleno od skutečného řešení. Hovoří se proto o pseudoptimálním řešení.

Při testu optimalizačního algoritmu bylo dosahováno úspory až deset procent z cestovní doby. Tento výsledek samozřejmě nemůže být paušalizován, neboť závisí na typu úlohy, dopravní síti a jejím zatížení.

## 8.1 Postřehy z řešení úlohy

Cíl práce, návrh funkčního algoritmu se podařilo splnit. Algoritmus byl navržen jak z ideového hlediska, tzn. metodiky výpočtu, tak z funkčního hlediska ve formě funkčního zdrojového kódu. Druhý aspekt je sice nezbytný pro běh algoritmu, ale z hlediska dopravního inženýra je mnohem zajímavější aspekt první, který bude dále rozebrán.

Základní rozdělení algoritmu je na část optimalizační a na část dopravního modelu. Dopravní model počítá jednotlivé varianty, které pak podléhají optimalizaci. Pro funkční návrh dopravního modelu bylo nezbytné řešit přidělení zatížení dopravní sítě, výpočet odporu dopravní sítě, tzn. doby zdržení na jednotlivých křižovatkách. Nutné bylo také generovat všechny možné, ale přitom nikoli nesmyslné varianty zákazu levých odbočení.

Přidělení cest na síť vychází z Dijkstrova algoritmu, který slouží pro hledání trasy nejmenšího odporu, v tomto případě trasy nejkratší. Dijkstrův algoritmus pracuje s odporem hran (komunikací), což se ukázalo jako nevhodné, protože z podstaty úlohy je spíše rozhodující odpor uzlů (křižovatek), který je navíc různý pro jednotlivé křižovatkové pohyby. Proto byla použita inverzní síť – hrany sítě byly nahrazeny uzly a tyto nové uzly propojeny hranami, reprezentujícími jednotlivé křižovatkové pohyby.

Automatický návrh signálního plánu si vyžádal přípravu obecného schématu fází, které bylo s to postihnout všech šestnáct variant zákazů na jedné křižovatce a zároveň různé kombinace dopravního zatížení. Navržené univerzální schéma kombinuje běžné fáze pro levé odbočení, přičemž obsahuje v sobě varianty jak pro větší intenzitu při jízdě přímo, tak pro větší intenzitu při odbočení vlevo. Schéma umožňuje vypustit každou ze čtyř signálních skupin pro odbočení vlevo včetně všech kombinací tak, aby celý koncept signálního plánu nebyl narušen při žádné z šestnácti variant zákazů levého odbočení.

Výpočet doby zdržení byl použit standardizovaný českými technickými předpisy – kalibrace modelu byla tedy zajištěna předpokládanou kalibrací hodnot a postupů zavedených TP 235, resp. jejich německým vzorem HBS. Jako významný problém se projevil výpočet cestovní doby, resp. doby zdržení při překročení kapacity. Použitou metodiku výpočtu doby zdržení nelze při překročení kapacity použít, což koneckonců vyplývá z podstaty překročení kapacity – ke křižovatce přijíždí více vozidel, než kolik jich může projet, následkem čehož se fronta vozidel stejně jako doba zdržení zvětšují do nekonečna; v praxi se zvětšují do doby snížení dopravní zátěže vlivem denních fluktuací dopravní zátěže. Doba zdržení tak bylo při překročení nutno nastavit fixně, a to větší, než při zatížení jen o trochu nižším než je kapacita. Při iteračním výpočtu ale kvůli této fixní, v podstatě prohibivní sazbě došlo k rozkmitání tras mezi dvojicí variant, kdy se střídaly křižovatky s překročenou a nepřekročenou kapacitou. Jako řešení bylo úspěšně zvoleno postupné zatěžování dopravní sítě, kdy se další přidávané části zátěže vyhýbají křižovatkám s již vyčerpanou kapacitou, neboť ty jsou pro běh Dijkstrova algoritmu penalizovány prohibivní sazbou.

Běh genetického algoritmu se ukázal velmi citlivý na zvolené pravděpodobnosti, které předurčují výskyt mutací, křížení a obecně výběr jedinců stávající generace pro generaci budoucí a které slouží jako jeho kalibrace. Obecně se dá říct, že buď se nastaví konzervativní hodnoty, které zaručí pomalou, ale relativně jistou konvergenci, nebo se zvolí méně konzervativní hodnoty, které zajistí sice rychlou konvergenci, která je ale zpravidla vystřídána ještě rychlejší divergencí, kdy se místo lepších řešení začínou vracet řešení horší. Ladění genetického algoritmu by si zasloužilo další pozornost, dá se říct, že by bylo vhodné navrhnout jeho optimalizaci, tzn. optimalizaci optimalizačního algoritmu. Osvědčilo se nastavení náhodně generovaných jedinců-variant nulté generace v obdobných parametrech, tzn. s obdobným počtem zákazů jako byly výsledky předchozích optimalizací.



Přestože byly varianty zákazů pro nultou generaci genetického algoritmu vybírány náhodně, vždy mezi ně byly vloženy povinné varianty, kdy zakázána byla všechna levá odbočení, a kdy naopak byla všechna levá odbočení povolena. Varianta "vše zakázáno" vycházela suverénně nejhůře, naopak varianta "vše povoleno" vycházela velmi dobře, ale nikoli nejlépe – nejlepší varianta byla z hlediska cestovního času zhruba až o 10 % lepší (viz kap. 7.8). Zde je ale nutné zdůraznit, že cílem navrženého algoritmu není a nemůže být definovat obecně platné nejlepší řešení, protože každá síť je jiná, ať už rozsahem, tvarem, kapacitou, dopravním zatížením či dalšími aspekty. Algoritmus je určen právě pro řešení jednotlivých sítí, které jsou vždy z toho či onoho hlediska originálem.

## 8.2 Praktické využití

Modelování dopravní sítě je běžnou činností při návrhu strategických dokumentů, jako jsou generely dopravy, územní plány či studie hodnotící zásadní dopravní stavby. Vytvoření dobrého modelu, jehož výsledky lze brát vážně i pro důležitá rozhodnutí, je náročná a drahá záležitost, a to zejména, je-li dělán ad hoc pro jednotlivou zakázku namísto průběžné aktualizace dlouhodobě využívaného modelu. Pořád se ale jedná o zlomek prostředků, které se vynakládají na výstavbu, údržbu a provoz dopravní sítě, nemluvě o nákladech uživatelů a o externalitách jen obtížně vyčíslitelných peněz. Využití optimalizační nadstavby nad strategické modely dopravní sítě by vedlo s nízkými náklady k významnému užítku.

Algoritmus vytvořený v rámci této disertační práce byl popsán na příkladu levých odbočení na náhodně vytvořené síti a náhodně vytvořeného zatížení. To ale neznamená, že je použitelný jen pro levá odbočení a jen pro náhodnou síť. Pro řešení jiného konkrétního úkolu jej lze modifikovat, pokud bude možné dodržet podmínky uvedené výše, tzn. schopnost automatické tvorby a hodnocení jednotlivých variant. Pro řešení konkrétní dopravní sítě pak stačí místo náhodných parametrů zadat parametry skutečné, což je sice velmi pracné, ale běžně dělané pro účely běžných modelů. Zároveň je možné a velmi vhodné algoritmus použít nad již využívaným SW pro strategické modelování, např. nad Matsimem. Dlouhodobě vyvíjené nástroje pochopitelně nabízejí více možností než nástroj ad hoc připravený pro potřeby ověření optimalizačního algoritmu.

Jistou překážkou pro aplikace optimalizace je výpočetní náročnost – místo jednoho výpočtu modelu je nutné počítat řadu variant, byť díky použití genetického algoritmu se jedná o naprostý zlomek celkového počtu variant. Řešení je v míře přesnosti modelu, tzn. v míře zjednodušení, kterou při modelování přijímáme – v zásadě každý model je pouze zjednodušením skutečnosti a pro předvýběr vhodné varianty z velkého množství variant se jeví velké zjednodušení jako přijatelné.

Závěrem komentáře o praktickém využití zkušeností z této disertační práce je vhodné připomenout okřídlené přísloví měněné dle okolností, kde je použito – dopravní model je dobrý sluha, ale zlý pán. Není záhodno bezmezně věřit výsledkům modelu, byť se zdá, resp. byť je prezentován jako sebelepší. Na druhou stranu umožňuje dobrý dopravní model svým autorům nahlédnout do budoucího chování uživatelů dopravní sítě výrazně lépe, než spekulování, intuice a kvalifikovaný odhad.





## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

### Předpisy

#### Tuzemské

BÍLÁ KNIHA. Plán jednotného evropského dopravního prostoru – vytvoření konkurenceschopného dopravního systému účinně využívajícího zdroje; 2011

Zákon č. 266/1994 Sb., o dráhách

Zákon č. 13/1997 Sb., o pozemních komunikacích

Zákon č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích

Zákon č. 296/2009 Sb., o sčítání lidu, domů a bytů v roce 2011

Zákon č. 194/2010 Sb., o veřejných službách v přepravě cestujících

Vyhláška Ministerstva dopravy a spojů č. 104/1997 Sb., kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích

Vyhláška Ministerstva dopravy č. 177/1995 Sb., kterou se vydává stavební a technický řád drah

ČSN 73 6100-1 Názvosloví pozemních komunikací – Část 1: Zákl. názvosloví; říjen 2008

ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic;

ČSN 73 6102 Projektování křižovatek na pozemních komunikacích; listopad 2007

Změna Z1; srpen 2011

Edice 2; červen 2012

ČSN 73 6110 Projektování místních komunikací; leden 2006

Změna Z1; únor 2010

ČSN 73 6380 Železniční přejezdy a přechody; duben 2004

Změna Z1; květen 2008

Oprava 1; červen 2010

Změna Z2; únor 2013

Změna Z3; srpen 2013

TP 81 Navrhování světelných signalizačních zařízení pro řízení silničního provozu; 1996

TP 135 Projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích, 2000

TP 188 Posuzování kapacity neřízených úrovnových křižovatek; 2008

TP 189 Stanovení intenzit dopravy na pozemních komunikacích; 2007

II. vydání; 2012

TP 225 Prognóza intenzit automobilové dopravy; 2010

II. vydání; 2012

TP 234 Posuzování kapacity okružních křižovatek; 2011

TP 235 Posuzování kapacity světelně řízených křižovatek; 2011

TP 236 Posuzování kapacity mimoúrovňových křižovatek; 2011



Metodický pokyn (Ministerstva dopravy ČR) 11/1995 Hodnocení variant tras pozemních komunikací z technického, dopravního a ekonomického hlediska

Prováděcí pokyny (Ministerstva dopravy ČR) pro hodnocení ekonomické efektivity projektů silničních a dálničních staveb; 2012 (přílohy aktualizovány 2014)

### Zahraniční

#### SLOVENSKÁ REPUBLIKA

TP 07/2013 Prognóza výhledových intenzit na cestní síti do roku 2040; 2013

TP 10/2010 Výpočet kapacit pozemních komunikací; 2010

#### SPOJENÉ KRÁLOVSTVÍ

Design Manual for Roads and Bridges; 2014

#### SPOJENÉ STÁTY AMERICKÉ

Highway Capacity Manual; 2010

#### SPOLKOVÁ REPUBLIKA NĚMECKO

Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen; 2009

### Publikace

ADÁMEK, Jan, 2011. *Vliv otevření části Pražského okruhu v úseku Slivence-Modletice (dálnice D1) na automobilovou dopravu*. Silniční obzor. Praha: Česká silniční společnost, roč. 72, č. 2.

ADÁMEK, Jan, 2011b. *Intenzita, nehodovost a kapacita neřízených a řízených křižovatek v Praze 2009-2010*. Silniční obzor. Praha: Česká silniční společnost, roč. 72, č. 12.

ADÁMEK, Jan, 2014. *Preference MHD světelnou signalizací: ano či ne*. Československý dopravák. XIII, č. 5, s. 34-48.

Akçelik, Rahmi, 1991. *Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time-dependent form and an alternative travel time function*. Australian Road Research 21 (3), pp. 49–59. (Minor revisions: December 2000).

APELTAUER T, 2010. *Generické vlastnosti modelů dopravního proudu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky. 133 s., 26 s. příloh. Doktorská práce. Vedoucím práce byl doc. RNDr. Jiří Macur, CSc.

APELTAUER, Tomáš, 2011. *Rozvoj moderních dopravních inteligentních systémů: Využití simulačních modelů v dopravě*. [online]. s. 36 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: [www.romodis.cz](http://www.romodis.cz)

BRAUNOVÁ, Dagmar, 2010. *Nová expresní autobusová linka 125 po Jižní spojce spojí Smíchovské nádraží s Jižním Městem*. BUSportal. Dostupný také z: <http://www.busportal.cz/modules.php?name=article&sid=8017>.



ČEJKA, Jiří, 2008. *Návrh systému veřejné linkové dopravy: s podporou matematických metod*. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.

ČÍHAL, Robert, 2009. *Možnosti popisu soukromých drah a vleček v integrovaném IS o železniční dopravní cestě v ČR*. [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://popis-trati.fd.cvut.cz/clanky-a-prispevky/soukromi-provozovatele-drahy-a-vleckari/moznosti-standardizovaneho-popisu-soukromych-drah-v-integrovanem-is-o-zeleznicni-dopravni-cestev-cr>

DOKOUPIL, Jaroslav a kol., 2010. ARCH.DESIGN. *Územní plán města Brna: Koncept*.

HALL, Fred L, 2011. *Traffic Flow Theory: Traffic Stream Characteristics*. Transportation Research Board.

HROMÁDKA, Vít, Tomáš CHORAZY, Martin SMĚLÝ, Martin VŠETEČKA a Tomáš VOLAŘÍK, 2014. *Systém sdílení kol Bike Sharing System: Studie proveditelnosti*.

JASTRZEBSKI, Waclaw P, 2000. *Volume delay functions*. In: 15th International EMME/2 Users' Group Conference.

KOKEŠ, Ondřej, 2011. *Úprava křižovatky silnic I/34 a II/164 u Jindřichova Hradce*. Brno, s přílohami a výkresy. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Michal Radimský, Ph.D.

KŘIVDA, Vladimír a Václav ŠKVAIN, 2013. *Městské komunikace a křižovatky: Modelování v dopravě*. [online]. [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://kds.vsb.cz/mkk/>

KUTIL, Michal. 2010. *Modeling and Optimization of Traffic Flow in Urban Areas*. Prague, Doctoral Thesis. Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Control Engineering. Vedoucí práce Zdeněk Hanzálek.

LANDA, Jiří a kol. CITYPLAN, 2003. *Aplikace dopravně logistických přístupů v městských aglomeracích*.

MACHUTOVÁ, Marcela, Jiří ČADEK, Čeněk SUDEK a Leoš TRŽIL, 2009. *Historie dopravní policie*. Vyd. 1. Praha: Milpo media, ISBN 978-80-87040-14-0.

MARTALOS, Jan a Aleš RICHTER, 2008. *Metody prognóz automobilové dopravy*.

MEDELSKÁ, Viera, Petr JIRAVA, Dušan NOP a Jiří ROJAN, 1991. *Dopravné inženýrstvo*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 374 s. ISBN 80-050-0737-X.

POLACH, Vlastimil a Tomáš VICHEREK, 2012. *Automatizace řízení dopravy*. Reportér AŽD Praha: Technický zpravodaj. 2/2012.

POHL, Jiří, 2014. Rychlá osobní železniční doprava: Díl padesátý čtvrtý: rychle i u nás podesáté. *Železniční Magazín*. č. 11/2014, s. 26-29.

POHL, Jiří, 2015. Rychlá osobní železniční doprava: Díl padesátý šestý: rychle i u nás podvanácté. *Železniční Magazín*. č. 5/2015, s. 26-29.

ŘSD, 2013. *Silnice a dálnice v České republice*.

SKOVAJSA, Ján, 2013. *Nové pojetí dálniční sítě*.



SÚKENNÍK, Peter, Petr HOFHANSL, Martin VARHULÍK, Zuzana VOLFOVÁ, Marek ŠÍDA, Tomáš APELTAUER, Martin VŠETEČKA, Jiří APELTAUER, Michal RADIMSKÝ a Martin SMĚLÝ, 2013. *Příručka pro tvorbu a hodnocení mikroskopických simulací*. Praha.

ŠLEGR, Petr, 2012. *Rychlá železnice i v České republice: High speed rail even in the Czech Republic*. Praha: Centrum pro efektivní dopravu, 2012, 246 s. ISBN 978-80-905005-0-1.

ŠÍMA, Jiří a Roman NERUDA, 1996. *Teoretické otázky neuronových sítí*. Praha, 390 s. ISBN 80-858-6318-9.

TEDA, Jaroslav, 2005 *Genetické algoritmy a jejich aplikace v praxi*. Programujte.com. Dostupné z: <http://programujte.com/clanek/2005072601-geneticke-algoritmy-a-jejich-aplikace-v-praxi/>

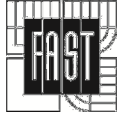
TUZAR, Antonín, Petr MAXA a Vladimír SVOBODA, 1997. *Teorie dopravy*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 278 s. ISBN 80-010-1637-4.

VANČURA, Pavel, 2008. *Racionalizace dopravní obslužnosti regionu*. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra technologie a řízení dopravy.

## Databáze a zdroje dat

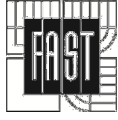
Celostátní sčítání dopravy v roce 2010, dostupné na <http://www.rsd.cz>

Sčítání lidu, domů a bytů 2011, dostupné na <http://www.czso.cz/>



## SEZNAM ZKRATEK

BASt	Bundes Anstalt für Straßenwesen, spolkový výzkumný ústav poz. komunikací
CSD	celostátní sčítání dopravy
ČSN	česká norma (původně Československá společnost normalizační)
ČSU	Český statistický úřad
DMRB	Design Manual for Roads and Bridges
GEH	statistika Geoffreyho E. Haverse
HBS	Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen
IDS	integrovaný dopravní systém
JMK	Jihomoravský kraj
MÚK	mimoúrovňová křižovatka
RPDI	roční průměr denních intenzit
ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic (České republiky)
Sb.	sbírka zákonů
SLBD	Sčítání lidu, domů a bytů
SSZ	světelné signalizační zařízení (pro řízení provozu na poz. komunikacích)
SW	software
TA ČR	Technologická agentura České republiky
TP	technické podmínky (Ministerstva dopravy České republiky)
ÚKD	úroveň kvality dopravy



## SLOVNÍČEK POJMŮ

Cesta	Pohyb po dopravní síti z výchozího do cílového bodu
Dopravní výkon	Součin počtu vozidel a jejich ujeté dráhy [ <b>vozk<sub>m</sub></b> ]
Intenzita (dopravního proudu)	Počet vozidel, která profilem projedou za jednotku času. Vždy je nutné uvést, zda se jedná o jednosměrný nebo obousměrný údaj. Dá se použít i pro přepravní ukazatele, byť pro počet cestujících, zejména na železnici, se užívá pojmu frekvence. [ <b>voz/h</b> ] nebo [ <b>voz/den</b> ]
Hustota (dopravního proudu)	Počet vozidel, které se v jeden okamžik nacházejí na jednotce délky komunikace. [ <b>voz/km</b> ]
Kapacita	Maximální dosažitelná intenzita daného prvku dopravní sítě.
Křížení	Místo, kde se komunikace půdorysně kříží, ale není možné přejet z jedné na druhou
Křižovatka	Místo, kde se komunikace půdorysně kříží a je možné přejet z jedné na druhou
Přepravní výkon	Součin počtu cestujících a jejich ujeté dráhy [ <b>osobok<sub>m</sub></b> ], mluvíme-li o popláve; součin počtu míst pro cestující a jejich ujeté dráhy [ <b>místok<sub>m</sub></b> ]; součin hmotnosti přepraveného zboží a jeho ujeté dráhy [ <b>tunok<sub>m</sub></b> ]; součin hmotnosti přepraveného zboží včetně vozidla a jejich ujeté dráhy [ <b>hrubé tunok<sub>m</sub></b> ]
Skladba (dopravního proudu)	Podíl kategorií vozidel (např. osobní automobily, nákladní automobily, autobusy) na dopravním proudu.
Trasa	Na sebe navazující hrany a uzly dopravní sítě, které jsou použity při cestě





## REJSTŘÍK

Cílová doprava .....	5	Pseudooptimální .....	46
Cyklus (signálního plánu) .....	58	Radiální uspořádání .....	10
Čínský pošťák .....	8	Roštové uspořádání.....	10
Dijkstrův algoritmus.....	30	Sedm mostů města Královce .....	8
Dopravní indukce .....	15	Selekce .....	46
Fáze (signálního plánu) .....	58	Signální skupina.....	58
Fitness .....	46	Strategický model dopravní sítě .....	27
Kalibrace modelu .....	27	Světelně řízená křižovatka .....	52
Křížení.....	47, 49	Systematická optimalizace.....	45
Mezičas .....	57	Teorie grafů .....	8
Model dopravního proudu .....	27	Tranzitní doprava.....	5
Mrtvá dopravní síť .....	5	Validace modelu .....	27
Mutace.....	47	Vnější doprava .....	5
Nepřavá síť .....	9	Vnitřní doprava.....	5
Obchodní cestující.....	8	Zdrojová doprava.....	5
Pokusná optimalizace.....	45	Živá dopravní síť .....	5
Pravá síť .....	9		



## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha A      Dijkstrův algoritmus – ukázka  
Příloha B      Návrh šablonového signálního plánu  
Příloha C      Zdrojový kód optimalizačního algoritmu v jazyce VBA

## PŘÍLOHA A: DIJKSTRŮV ALGORITMUS – UKÁZKA

Dijkstrův algoritmus slouží k nalezení cesty nejmenšího odporu mezi jedním (výchozím) uzlem a zbylými uzly. Odporům může být délka, doba jízdy, cena apod.; odpor může být jiný v každém z obou směrů každé hrany.

Postup algoritmu je nejlépe vidět na příkladu, ve kterém budeme hledat nejkratší cestu z uzlu číslo 1. Při běhu algoritmu se budeme řídit následujícími pravidly:

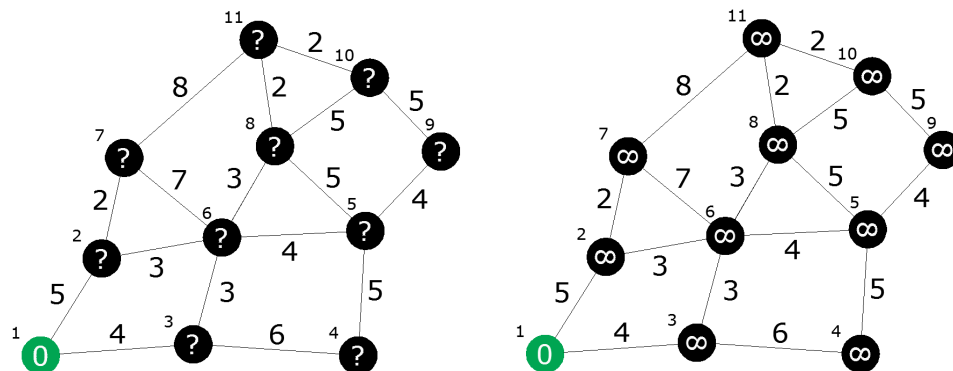
Vedeme seznam uzlů, kdy u každého zapisujeme zatím známou nejkratší trasu, resp. nejkratší vzdálenost od výchozího uzlu. Najdeme-li v následujícím kroku trasu kratší, pak původní trasu nahradíme novou, kratší trasou. Uzlům, u kterých zatím nevíme, zda nalezená trasa je nejkratší, budeme říkat "odemknuté". Defaultní vzdálenost všech uzlů nastavíme jako hodnotu bezpečně vyšší než reálná vzdálenost, např. nekonečno.

V každém kroku vycházíme z uzlu, který je ze všech "odemknutých" uzlů výchozímu uzlu nejbližší – tento uzel zároveň "uzamkneme", čímž zdůrazňujeme, že nalezená trasa je s jistotou nejkratší (trasa přes ostatní odemknuté uzly musí být z principu delší, když ony ostatní uzly jsou od výchozího uzlu dál a ještě k nim vede hrana nějaké nezáporné délky).

Postup má tolik kroků, kolik je počet uzlů méně jedna – o posledním uzlu se již nemusí rozhodovat, protože zbude. Pokud má více uzlů stejnou vzdálenost, lze je uzamknout zároveň a tím snížit počet kroků, nebo držet jednodušší algoritmus (kód programu) a brát tyto uzly postupně.



Obr. A-1. Legenda k dopravním sítím na následujících obrázcích.



Obr. A-2. Zadání sítě pro ukázkou Dijkstrova algoritmu – za neznámou vzdálenost ze začátku dosadíme defaultní vzdálenost nekonečně.

**Krok 1.** začneme ve výchozím uzlu číslo 1, ukážeme na uzly k němu sousední a spočítáme jejich vzdálenost od uzlu výchozího. Jsou to tedy uzly číslo 2 a 3 a jejich vzdálenost od výchozího uzlu je 5 a 4. Poté určíme nejbližší uzly výchozího uzlu, kterým je uzel číslo 3 vzdálený 4 jednotky od výchozího uzlu. Tento uzel tzv. zamkneme, což signalizuje, že k němu již nevede žádná kratší cesta, resp. že nejkratší cestu již známe.

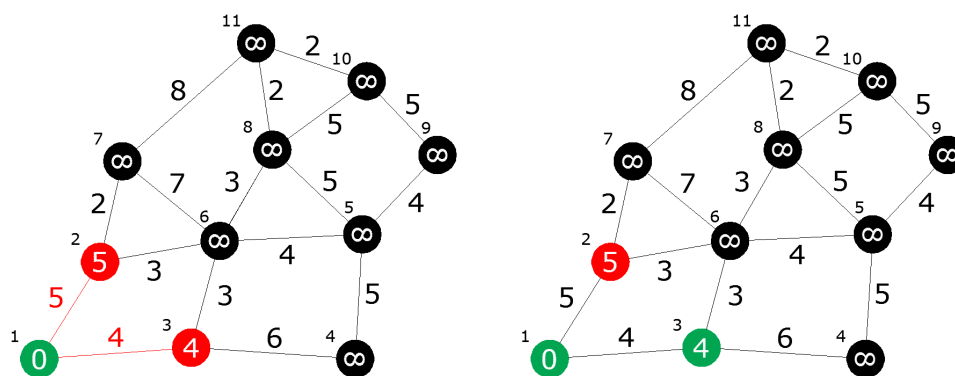
### Začínáme uzlem

uzel 1    vzd. 0    trasa 1

### Sousední uzly

uzel 2    vzd. 0+5=5    trasa 1-2

uzel 3    vzd. 0+4=4    trasa 1-3



Obr. A-3. První krok Dijkstrova algoritmu.

### Záznam hledaných tras a vzdáleností

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	odemknutý
3	1-3	4	odemknutý > zamknutý
4			neznámý
5			neznámý
6			neznámý
7			neznámý
8			neznámý
9			neznámý
10			neznámý
11			neznámý

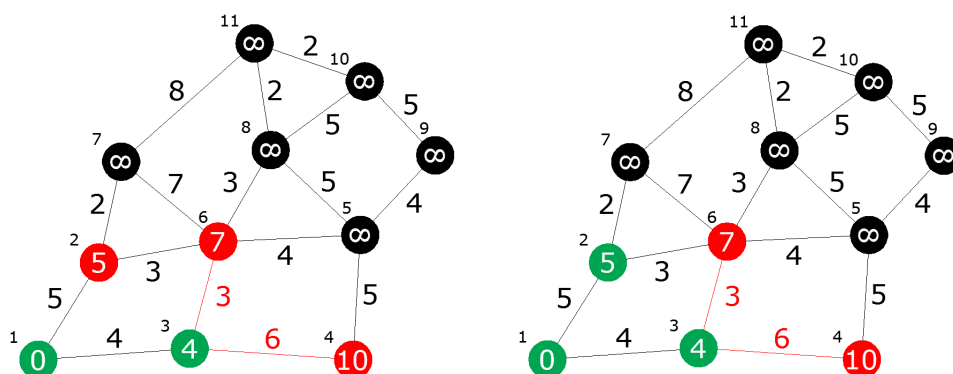
**Krok 2.** Začínáme uzlem, který jsme zamknuli v předešlém kroku, tzn. uzlem číslo 3. Opět k němu určíme uzly sousední a určíme jejich vzdálenost k výchozímu uzlu právě přes uzel 3. To znamená, že délku hrany uzel 3 – Sousední uzel přičteme k již uzamčené vzdálenosti uzlu č. 3. Z dosud nezamčených uzlů č. 2 (předchozí krok), 4 a 6 (tento krok) vybereme ten nejbližší výchozímu uzlu, což je uzel č. 2, a uzamkneme jej.

### Začínáme uzlem

uzel 3    vzd. 4    trasa 1-3

### Sousední uzly

uzel 4    vzd. 4+6=10    trasa 1-3-4  
uzel 6    vzd. 4+3=7    trasa 1-3-6



Obr. A-4. Druhý krok Dijkstrova algoritmu.

### Záznam hledaných tras a vzdáleností

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	odemknutý > zamknutý
3	1-3	4	zamknutý
4	1-3-4	10	odemknutý
5			neznámý
6	1-3-6	7	odemknutý
7			neznámý
8			neznámý
9			neznámý
10			neznámý
11			neznámý

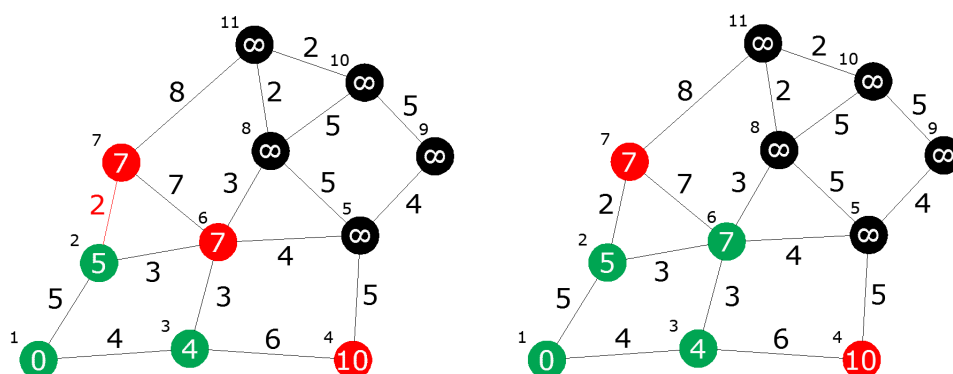
**Krok 3.** Vycházíme opět z uzlu zamčeného v minulém kroku, tzn. od uzlu 2. Sousedním uzlem je jednak bod č. 7, jehož vzdálenost přes uzel 2 je 7 jednotek, a jednak uzel 6, jehož vzdálenost přes uzel 2 je 8, ale v minulém kroku má již odemknutou vzdálenost 7, takže ponecháváme nižší vzdálenost 7, resp. cestu přes uzel 3. Z odemknutých vzdáleností máme vybrat tu nejkratší, ale pozor, máme dva různé uzly se vzdáleností 7. Zde musí rozhodnout buď technické řešení algoritmu (např. že postupuje podle ID bodu nebo podle pořadí dosažení odemknuté vzdálenosti), nebo náhoda (losování). My jsme si vylosovali, že uzamkneme uzel č. 6. Tato nejednoznačnost nemá vliv na konečné vzdálenosti jednotlivých bodů od bodu výchozího, ale na volbu trasy z tras stejně dlouhých.

**Začínáme uzlem**

uzel 2    vzd. 5    trasa 1-2

**Sousední uzly**

uzel 6    vzd. 5+3=8    trasa 1-2-6  
uzel 7    vzd. 5+2=7    trasa 1-2-7



Obr. A-5. Třetí krok Dijkstrova algoritmu.

**Záznam hledaných tras a vzdáleností**

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	zamknutý
3	1-3	4	zamknutý
4	1-3-4	10	odemknutý
5			neznámý
6	1-3-6	7	odemknutý > zamknutý
7	1-2-7	7	odemknutý
8			neznámý
9			neznámý
10			neznámý
11			neznámý



**Krok 4.** Vycházíme z uzlu 6, určíme vzdálenost sousedních uzlů 5, 8 a 7 (u č. 7 opět respektujeme již zjištěnou kratší vzdálenost). Nejbližším z odemknutých uzlů je č. 7, který zbyl z "losování" v minulém kole.

#### Začínáme uzlem

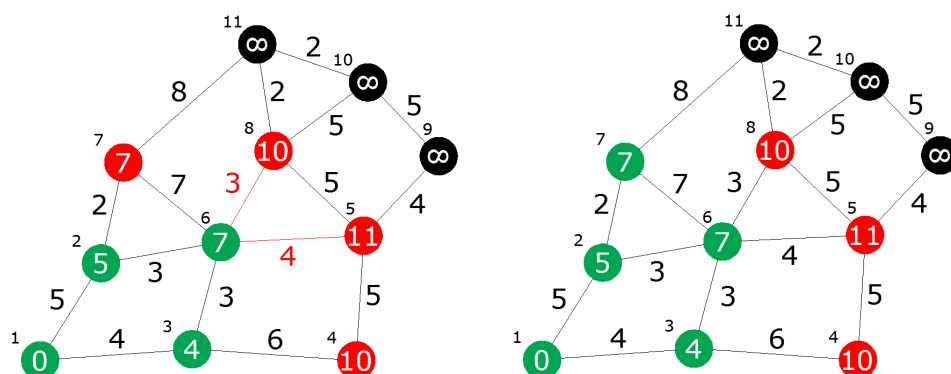
uzel 6 vzd. 7 trasa 1-3-6

#### Sousední uzly

uzel 5 vzd.  $7+4=11$  trasa 1-3-6-5

uzel 7 vzd.  $7+7=14$  trasa 1-3-6-7

uzel 8 vzd.  $7+3=10$  trasa 1-3-6-8



Obr. A-6. Čtvrtý krok Dijkstrova algoritmu.

#### Záznam hledaných tras a vzdáleností

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	zamknutý
3	1-3	4	zamknutý
4	1-3-4	10	odemknutý
5	1-3-6-5	11	odemknutý
6	1-3-6	7	zamknutý
7	1-2-7	7	odemknutý > zamknutý
8	1-3-6-8	10	odemknutý
9			neznámý
10			neznámý
11			neznámý

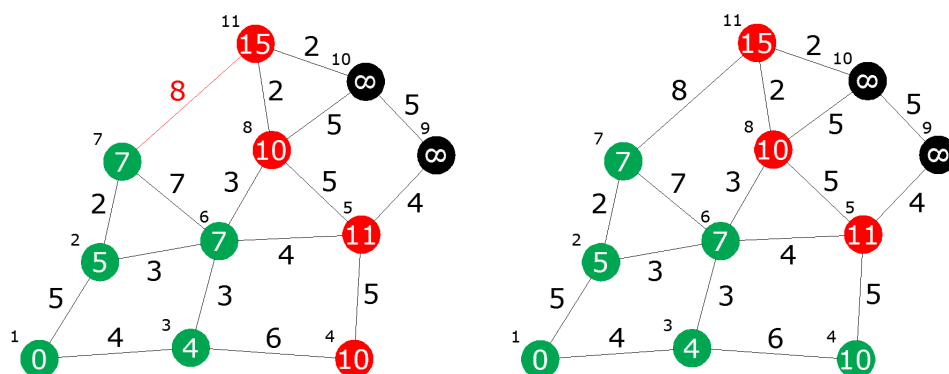
**Krok 5.** Výchozím uzlem je č. 7, které má jediného nezamknutého souseda a to je č. 11. Opět dochází k losování, který z bodů se vzdáleností 10 jednotek od výchozího uzlu zamkne – bude to uzel č. 7.

### Začínáme uzlem

uzel 7 vzd. 7 trasa 1-2-7

### Sousední uzly

uzel 11 vzd. 7+8=15 trasa 1-2-7-11



Obr. A-7. Pátý krok Dijkstrova algoritmu.

### Záznam hledaných tras a vzdáleností

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	zamknutý
3	1-3	4	zamknutý
4	1-3-4	10	odemknutý > zamknutý
5	1-3-6-5	11	odemknutý
6	1-3-6	7	zamknutý
7	1-2-7	7	zamknutý
8	1-3-6-8	10	odemknutý
9			neznámý
10			neznámý
11	1-2-7-11	15	odemknutý

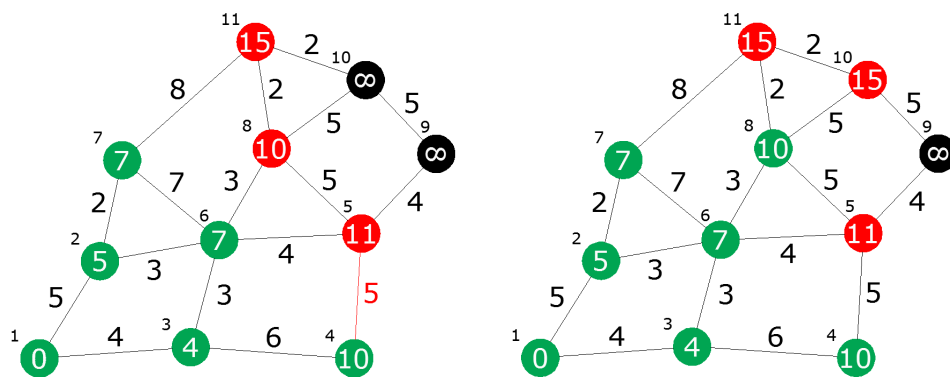
**Krok 6.** Uzel číslo 4 má jediného souseda, ale ten již má kratší odemknutou vzdálenost, proto se po tomto kroku nic z pole vzdáleností nezmění a zamkneme nejbližší uzel, tzn. č. 8.

### Začínáme uzlem

uzel 4    vzd. 10    trasa 1-3-4

### Sousední uzly

uzel 5    vzd. 10+5=15    trasa 1-3-4-5



Obr. A-8. Šestý krok Dijkstrova algoritmu.

### Záznam hledaných tras a vzdáleností

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	zamknutý
3	1-3	4	zamknutý
4	1-3-4	10	zamknutý
5	1-3-6-5	11	odemknutý
6	1-3-6	7	zamknutý
7	1-2-7	7	zamknutý
8	1-3-6-8	10	odemknutý > zamknutý
9			neznámý
10			neznámý
11	1-2-7-11	15	odemknutý

**Krok 7.** K uzlu číslo 8 máme dva neuzamknuté sousedy, uzly 10 a 11. A pozor, poprvé v našem příkladu přepíšeme již zapsanou, ale neuzamknutou vzdálenost. Uzel 11 je blíže přes uzel 8, než přes uzel 7, který je sám výchozímu uzlu blíže a proto jsme přes něj šli v dřívějším kroku. Zamykat budeme uzel č. 5, který je odemčený již z 4tého kroku.

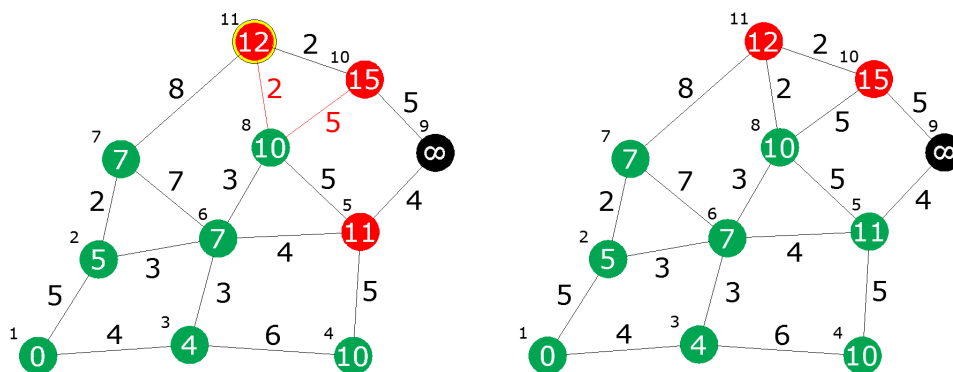
### Začínáme uzlem

uzel 8 vzd. 10 trasa 1-3-6-8

### Sousední uzly

uzel 10 vzd. 10+5=15 trasa 1-3-6-8-10

uzel 11 vzd. 10+2=12 trasa 1-3-6-8-11



Obr. A-9. Sedmý krok Dijkstrova algoritmu.

### Záznam hledaných tras a vzdáleností

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	zamknutý
3	1-3	4	zamknutý
4	1-3-4	10	zamknutý
5	1-3-6-5	11	odemknutý > zamknutý
6	1-3-6	7	zamknutý
7	1-2-7	7	zamknutý
8	1-3-6-8	10	zamknutý
9			neznámý
10	1-3-6-8-10	15	odemknutý
11	1-3-6-8-11	12	odemknutý

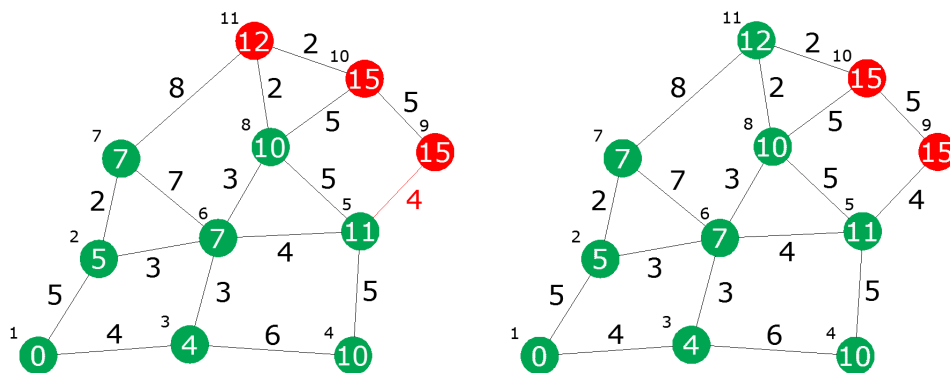
**Krok 8.** Uzlu 5 zbývá jediný odemknutý uzel, a to č. 9. Zamykat se bude č. 11.

**Začínáme uzlem**

uzel 5 vzd. 11 trasa 1-3-6-5

**Sousední uzly**

uzel 9 vzd. 11+4=15 trasa 1-3-6-5-9



Obr. A-10. Osmý krok Dijkstrova algoritmu.

**Záznam hledaných tras a vzdáleností**

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	zamknutý
3	1-3	4	zamknutý
4	1-3-4	10	zamknutý
5	1-3-6-5	11	zamknutý
6	1-3-6	7	zamknutý
7	1-2-7	7	zamknutý
8	1-3-6-8	10	zamknutý
9	1-3-6-5-9	15	odemknutý
10	1-3-6-8-10	15	odemknutý
11	1-3-6-8-11	12	odemknutý > zamknutý

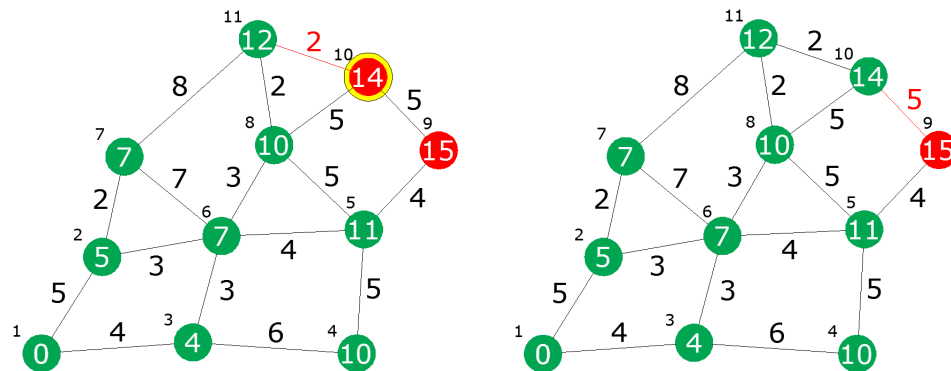
**Krok 9.** Přes uzel 11 určíme vzdálenost uzlu 10, která je sem kratší než dříve nalezená cesta přes uzel 8. Uzamykáme uzel 10.

**Začínáme uzlem**

uzel 11 vzd. 12 trasa 1-3-6-8-11

**Sousední uzly**

uzel 10 vzd. 12+2=14 trasa 1-3-6-8-11-10



Obr. A-11. Devátý krok Dijkstrova algoritmu.

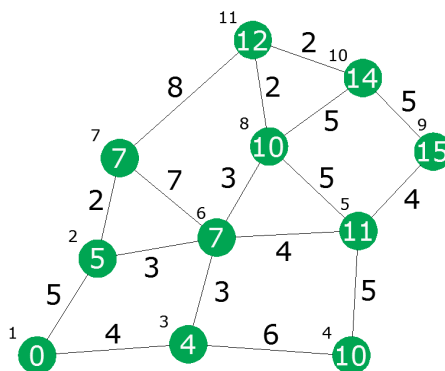
**Záznam hledaných tras a vzdáleností**

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	zamknutý
3	1-3	4	zamknutý
4	1-3-4	10	zamknutý
5	1-3-6-5	11	zamknutý
6	1-3-6	7	zamknutý
7	1-2-7	7	zamknutý
8	1-3-6-8	10	zamknutý
9	1-3-6-5-9	15	odemknutý
10	1-3-6-8-11-10	14	odemknutý > zamknutý
11	1-3-6-8-11	12	zamknutý



**Krok 10.** Zbývá nám poslední uzel, a to č. 9, který je blíže přes dřívější nalezenou cestu. Tímto celý algoritmus končí – pro všechny uzly 2 až 11 jsme našli nejkratší cestu, resp. určili jejich nejkratší vzdálenost k výchozímu uzlu (č. 1).

Začínáme uzlem	Sousední uzly
uzel 10 vzd. 14 trasa 1-3-6-8-11-10	uzel 9 vzd. 14+5=19 trasa 1-3-6-8-11-10-9



Obr. A-12. Desátý krok Dijkstrova algoritmu.

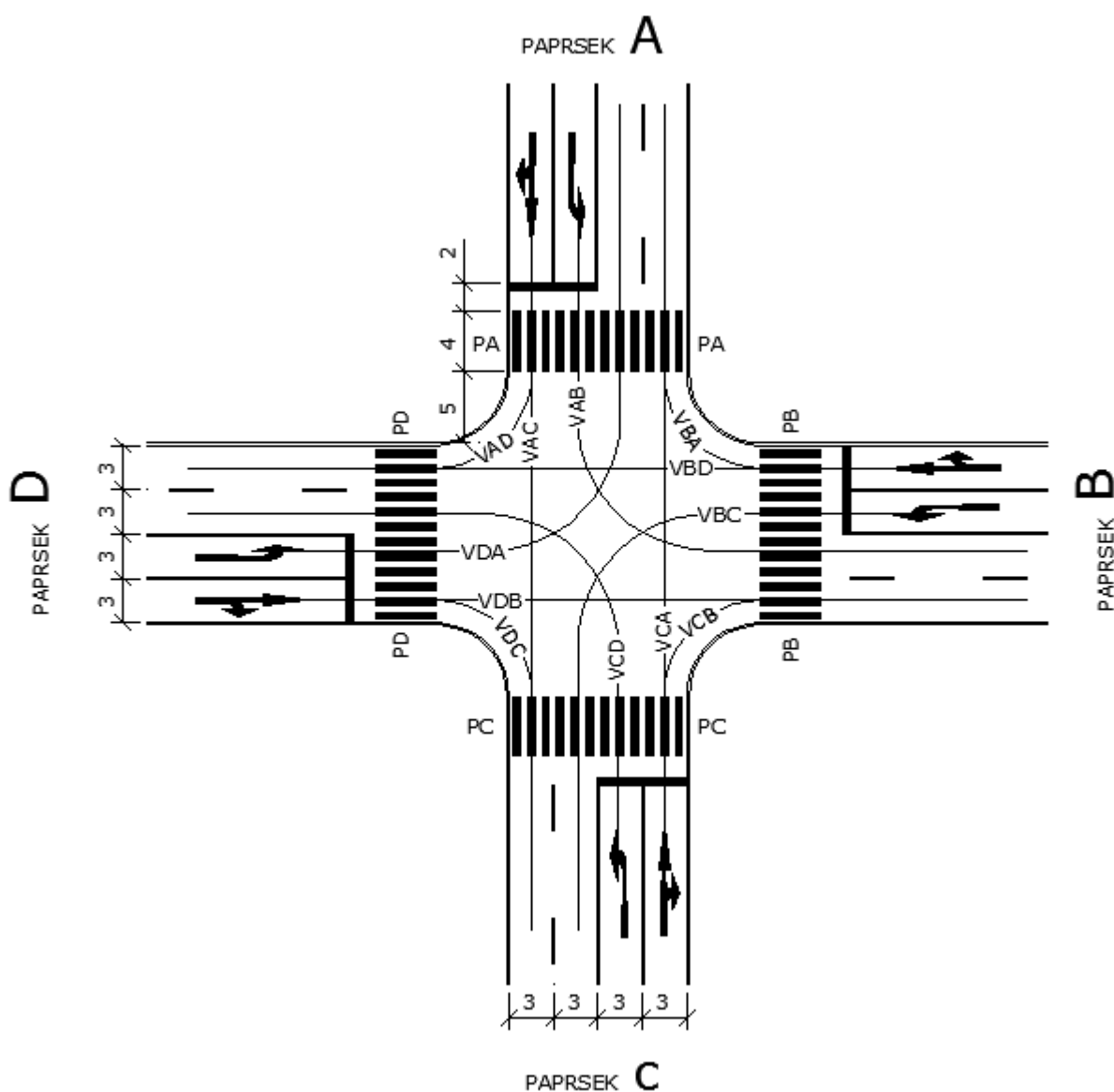
#### Záznam hledaných tras a vzdáleností

Uzel	Trasa (přes uzly č.)	Vzdálenost	Stav
1	výchozí	0	zamknutý
2	1-2	5	zamknutý
3	1-3	4	zamknutý
4	1-3-4	10	zamknutý
5	1-3-6-5	11	zamknutý
6	1-3-6	7	zamknutý
7	1-2-7	7	zamknutý
8	1-3-6-8	10	zamknutý
9	1-3-6-5-9	15	odemknutý > zamknutý
10	1-3-6-8-11-10	14	zamknutý
11	1-3-6-8-11	12	zamknutý



## PŘÍLOHA B: NÁVRH ŠABLONOVÉHO SIGNÁLNÍHO PLÁNU

Uzly dopravní sítě jsou uvažovány jako průsečné křižovatky čtyřpruhových komunikací. Jejich geometrie je patrná z obr. B-1. Rozměrovou předlohou jsou křižovatky sběrných komunikací (funkční skupina B) v předválečné zástavbě města Brna. Návrh je proveden pro křižovatku bez zákazů odbočení a pro křižovatku, na které dojde k zakazu levých odbočení.



**Obr. B-1.** Geometrické uspořádání křižovatky. Vyznačené trajektorie jsou orientační – najížděcí a vyklizovací dráhy jsou odměřeny na stranu bezpečnou.

Prvním krokem návrhu je výpočet **mezičasů** pro všechny dvojice kolizních pohybů. Mezičas se vypočte dle vztahu:

$$M = t_V - t_N + t_{BO}$$

Kde:

M	mezičas [s]
$t_V$	vyklizovací doba [s]
$t_N$	najížděcí doba [s]
BO	bezpečnostní odstup [s]

Přičemž

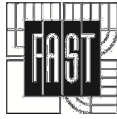
$$t_V = (S_V + l_{VOZ}) / V_V$$
$$t_N = S_N / V_N$$

Kde:

$S_V$	vyklizovací dráha [m]
$S_N$	najížděcí dráha [m]
$l_{VOZ}$	délka vozidla [m]
$V_V$	vyklizovací rychlost [m/s, resp. km/h]
$V_N$	najížděcí rychlost [m/s, resp. km/h]

Výpočet vychází ze základních hodnot dle TP 81:

- vyklizovací a najížděcí rychlost  $V_V$  a  $V_N$  shodně:
  - vozidla jedoucí přímo 35 km/h
  - vozidla odbočující 25 km/h
  - chodci 5 km/h
- bezpečnostní odstup BO
  - pro vyklizující vozidla 2 s
  - pro vyklizující chodce 0 s
- délka vozidla  $l_{VOZ}$  je 5 m



VYKLIZOVACÍ DRÁHA [m]																			
		délka vozidla	najíždí															∑x	
			VAB	VAC	VAD	VBA	VBC	VBD	VCA	VCB	VCD	VDA	VDB	VDC	PA	PB	PC		PD
vyklizuje	VAB	5	x	x	x	x	22	14	22	25	x	16	25	x	6	31	x	x	8
	VAC	5	x	x	x	x	26	14	x	x	19	20	23	26	6	x	32	x	8
	VAD	5	x	x	x	x	x	16	x	x	16	x	x	x	6	x	x	22	12
	VBA	5	x	x	x	x	x	x	16	x	x	16	x	x	22	6	x	x	12
	VBC	5	16	25	x	x	x	x	14	x	22	x	22	25	x	6	31	x	8
	VBD	5	20	23	26	x	x	x	14	x	26	19	x	x	x	6	x	32	8
	VCA	5	19	x	x	26	20	23	x	x	x	26	14	x	32	x	6	x	8
	VCB	5	16	x	x	x	x	x	x	x	x	x	16	x	x	22	6	x	12
	VCD	5	x	22	25	x	16	25	x	x	x	22	14	x	x	x	6	31	8
	VDA	5	22	14	x	25	x	22	25	x	16	x	x	x	31	x	x	6	8
	VDB	5	26	14	x	x	19	x	23	26	20	x	x	x	x	32	x	6	8
	VDC	5	x	16	x	x	16	x	x	x	x	x	x	x	x	x	22	6	12
	PA	0	9	12	12	12	x	x	12	x	x	12	x	x	x	x	x	x	10
	PB	0	12	x	x	12	9	12	x	12	x	x	12	x	x	x	x	x	10
	PC	0	x	12	x	x	12	x	12	12	9	x	x	12	x	x	x	x	10
	PD	0	x	x	12	x	x	12	x	x	12	9	12	12	x	x	x	x	10
∑x			8	8	12	12	8	8	8	12	8	8	8	12	10	10	10	10	

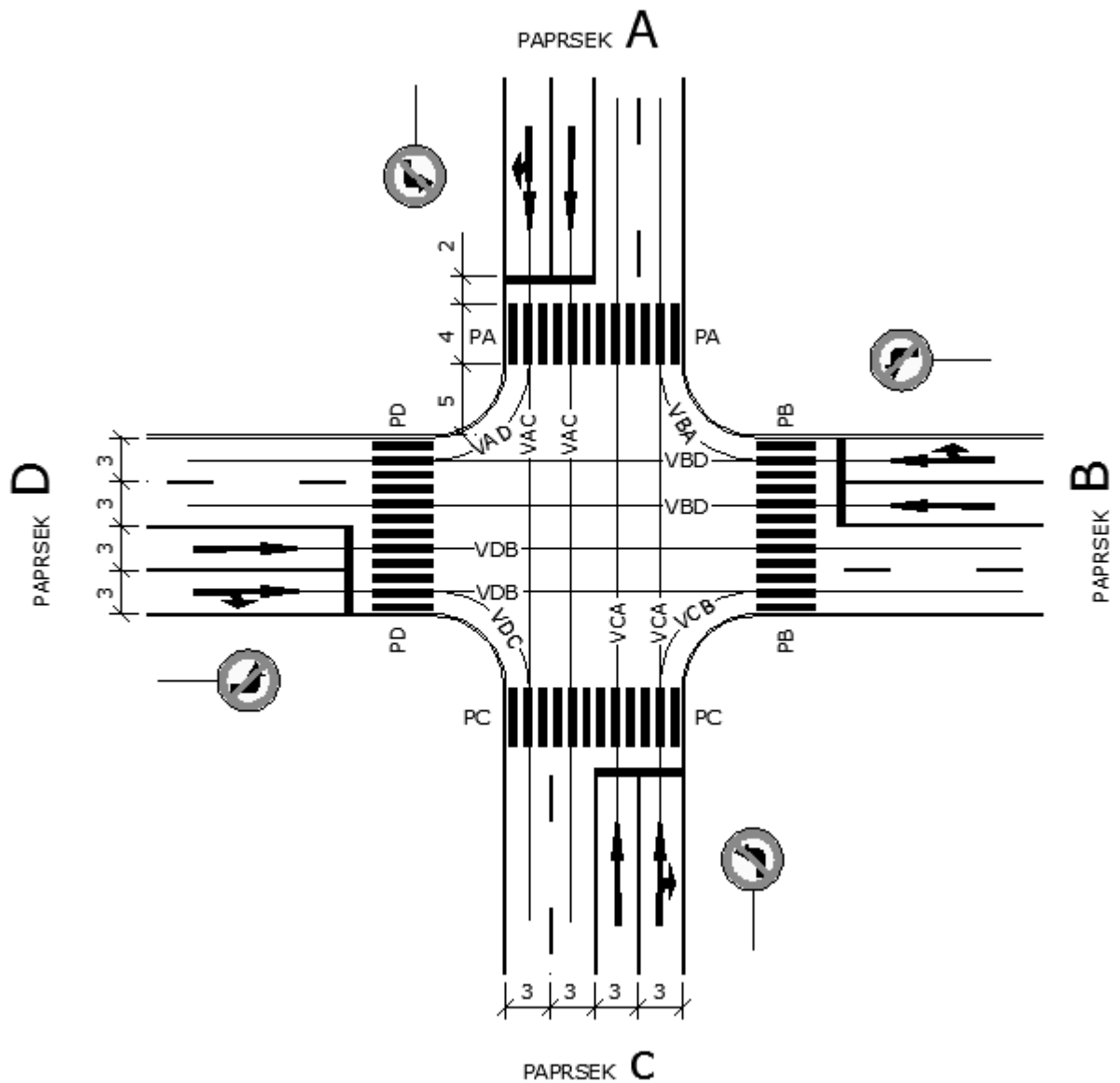
NAJÍZDEČÍ DRÁHA [m]																			
			najíždí															□	
			VAB	VAC	VAD	VBA	VBC	VBD	VCA	VCB	VCD	VDA	VDB	VDC	PA	PB	PC		PD
vyklizuje	VAB		x	x	x	x	10	14	14	11	x	16	17	x	3	0	x	x	8
	VAC		x	x	x	x	20	20	x	x	16	11	11	11	0	x	0	x	8
	VAD		x	x	x	x	20	x	x	20	x	x	x	0	x	x	0	x	12
	VBA		x	x	x	x	x	x	20	x	x	20	x	x	0	0	x	x	12
	VBC		16	17	x	x	x	x	14	x	10	x	14	11	x	3	0	x	8
	VBD		11	11	11	x	x	x	20	x	20	16	x	x	x	0	x	0	8
	VCA		16	x	x	11	11	11	x	x	x	20	20	x	0	x	0	x	8
	VCB		20	x	x	x	x	x	x	x	x	20	x	x	0	0	0	x	12
	VCD		x	14	11	x	16	17	x	x	x	10	14	x	x	x	3	0	8
	VDA		10	14	x	11	x	14	17	x	16	x	x	x	0	x	x	3	8
	VDB		20	20	x	x	16	x	11	11	11	x	x	x	x	0	x	0	8
	VDC		x	20	x	x	20	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	12
	PA		2	2	2	18	x	x	28	x	x	27	x	x	x	x	x	x	10
	PB		27	x	x	2	2	2	2	x	18	x	x	28	x	x	x	x	10
	PC		x	28	x	x	27	x	2	2	2	x	x	18	x	x	x	x	10
	PD		x	x	18	x	x	28	x	x	27	2	2	2	x	x	x	x	10
□			8	8	12	12	8	8	8	12	8	8	8	12	10	10	10	10	

VYKLIZOVACÍ DOBA [s]																			
		rychlost [km/h]	najíždí																
			VAB	VAC	VAD	VBA	VBC	VBD	VCA	VCB	VCD	VDA	VDB	VDC	PA	PB	PC		PD
vyklizuje	VAB	25	x	x	x	x	3,4	2,4	3,4	3,8	x	2,7	3,8	x	1,4	4,6	x	x	
	VAC	35	x	x	x	x	2,8	1,7	x	x	2,2	2,3	2,5	2,8	1,0	x	3,3	x	
	VAD	25	x	x	x	x	x	2,7	x	x	2,7	x	x	x	1,4	x	x	3,4	
	VBA	25	x	x	x	x	x	2,7	x	x	2,7	x	x	x	3,4	1,4	x	x	
	VBC	25	2,7	3,8	x	x	x	2,4	x	3,4	x	3,4	3,8	x	1,4	4,6	x	x	
	VBD	35	2,3	2,5	2,8	x	x	x	1,7	x	2,8	2,2	x	x	x	1,0	x	3,3	
	VCA	35	2,2	x	x	2,8	2,3	2,5	x	x	x	2,8	1,7	x	3,3	x	1,0	x	
	VCB	25	2,7	x	x	x	x	x	x	x	x	2,7	x	x	3,4	1,4	x	x	
	VCD	25	x	3,4	3,8	x	2,7	3,8	x	x	x	3,4	2,4	x	x	x	1,4	4,6	
	VDA	25	3,4	2,4	x	3,8	x	3,4	3,8	x	2,7	x	x	x	4,6	x	x	1,4	
	VDB	35	2,8	1,7	x	x	2,2	x	2,5	2,8	2,3	x	x	x	x	3,3	x	1,0	
	VDC	25	x	2,7	x	x	2,7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3,4	1,4	
	PA	5	5,7	7,6	7,6	7,6	x	x	7,6	x	x	7,6	x	x	x	x	x	x	
	PB	5	7,6	x	x	7,6	5,7	7,6	x	7,6	x	7,6	x	x	x	x	x	x	
	PC	5	x	7,6	x	x	7,6	x	7,6	7,6	5,7	x	x	7,6	x	x	x	x	
	PD	5	x	x	7,6	x	x	7,6	x	x	7,6	5,7	7,6	7,6	x	x	x	x	

NAJÍZDĚCÍ DOBA [s]																	
		najíždí															
		[km/h] rychlost	VAB	VAC	VAD	VBA	VBC	VBD	VCA	VCB	VCD	VDA	VDB	VDC	PA	PB	PC
vyklizuje	VAB	x	x	x	x	1,3	1,3	1,3	1,4	x	2,0	1,5	x	1,9	0,0	x	x
	VAC	x	x	x	x	2,5	1,8	x	x	2,0	1,4	1,0	1,4	0,0	x	0,0	x
	VAD	x	x	x	x	x	1,8	x	x	2,5	x	x	x	0,0	x	x	0,0
	VBA	x	x	x	x	x	x	1,8	x	x	2,5	x	x	0,0	0,0	x	x
	VBC	2,0	1,5	x	x	x	x	1,3	x	1,3	x	1,3	1,4	x	1,9	0,0	x
	VBD	1,4	1,0	1,4	x	x	x	1,8	x	2,5	2,0	x	x	x	0,0	x	0,0
	VCA	2,0	x	x	x	1,4	1,4	1,0	x	x	2,5	1,8	x	0,0	x	0,0	x
	VCB	2,5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1,8	x	x	0,0	0,0	x
	VCD	x	1,3	1,4	x	2,0	1,5	x	x	x	1,3	1,3	x	x	x	1,9	0,0
	VDA	1,3	1,3	x	1,4	x	1,3	1,5	x	2,0	x	x	x	0,0	x	x	1,9
	VDB	2,5	1,8	x	x	2,0	x	1,0	1,4	1,4	x	x	x	x	0,0	x	0,0
	VDC	x	1,8	x	x	2,5	x	x	x	x	x	x	x	x	0,0	x	0,0
	PA	0,3	0,2	0,3	2,3	x	x	2,5	x	x	3,4	x	x	x	x	x	x
	PB	3,4	x	x	0,3	0,3	0,2	x	2,3	x	x	2,5	x	x	x	x	x
	PC	x	2,5	x	x	3,4	x	0,2	0,3	0,3	x	x	2,3	x	x	x	x
PD	x	x	2,3	x	x	2,5	x	x	3,4	0,3	0,2	0,3	x	x	x	x	

MEZIČAS [s]																		
		bezpečn.	najíždí															
		odstup [s]	VAB	VAC	VAD	VBA	VBC	VBD	VCA	VCB	VCD	VDA	VDB	VDC	PA	PB	PC	PD
vyklizuje	VAB	2	x	x	x	x	4	3	4	4	x	3	4	x	1	7	x	x
	VAC	2	x	x	x	x	2	2	x	x	2	3	4	3	3	x	5	x
	VAD	2	x	x	x	x	x	3	x	x	2	x	x	x	3	x	x	5
	VBA	2	x	x	x	x	x	3	x	x	2	x	x	5	3	x	x	
	VBC	2	3	4	x	x	x	3	x	4	x	4	4	x	1	7	x	
	VBD	2	3	4	3	x	x	x	2	x	2	2	x	x	x	3	x	5
	VCA	2	2	x	x	3	3	4	x	x	x	2	2	x	5	x	3	x
	VCB	2	2	x	x	x	x	x	x	x	x	3	x	x	5	3	3	x
	VCD	2	x	4	4	x	3	4	x	x	x	4	3	x	x	x	1	7
	VDA	2	4	3	x	4	x	4	4	x	3	x	x	x	7	x	x	1
	VDB	2	2	2	x	x	2	x	4	3	3	x	x	x	x	5	x	3
	VDC	2	x	3	x	x	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	5	3
	PA	0	5	7	7	5	x	x	5	x	x	4	x	x	x	x	x	x
	PB	0	4	x	x	7	5	7	x	5	x	x	5	x	x	x	x	x
	PC	0	x	5	x	x	4	x	7	7	5	x	x	5	x	x	x	x
PD	0	x	x	5	x	x	5	x	x	4	5	7	7	x	x	x	x	

Tvorba tabulek byla usnadněna symetrickým tvarem křižovatky, kdy pro středově souměrné dvojice jsou hodnoty stejné. Z tabulky je zřejmé, že mezičasy mezi signálními skupinami pro vozidla je nejvýše 4 sekundy. Pro dvojice skupin, kde jednou z nich jsou pěší, nabývají mezičasy hodnoty až 7 sekund.



Obr. B-2. Geometrické uspořádání křižovatky, na které byla zakázána odbočení vlevo a z řadících pruhů vlevo se staly druhé pruhy pro jízdu přímo. Vyznačené trajektorie jsou orientační – najížděcí a vyklizovací dráhy jsou odměřeny na stranu bezpečnou.





VYKLIZOVACÍ DRÁHA [m]																			
	délka vozidla	najíždí														∑ x			
		<del>VAC</del>	VAC	VAD	VBA	<del>VBC</del>	VBD	VCA	VCB	<del>VCI</del>	<del>VBA</del>	VDB	VDC	PA	PB		PC	PD	
vyklizuje	<del>VAC</del>																		
	VAC	5	x	x	x		17	x	x			23	26	6	x	32	x	7	
	VAD	5	x	x	x		16	x	x			x	x	6	x	x	22	9	
	VBA	5	x	x	x		x	16	x			x	x	22	6	x	x	9	
	<del>VBC</del>																		
	VBD	5	23	26	x		x	17	x			x	x	x	6	x	32	7	
	VCA	5	x	x	26		23	x	x			17	x	32	x	6	x	7	
	VCB	5	x	x	x		x	x	x			16	x	x	22	6	x	9	
	<del>VCI</del>																		
	<del>VBA</del>																		
	VDB	5	17	x	x		x	23	26			x	x	x	32	x	6	7	
	VDC	5	16	x	x		x	x	x			x	x	x	x	22	6	9	
	PA	0	12	12	12		x	12	x			x	x	x	x	x	x	8	
	PB	0	x	x	12		12	x	12			12	x	x	x	x	x	8	
PC	0	12	x	x		x	12	12			x	12	x	x	x	x	8		
PD	0	x	12	x		12	x	x			12	12	x	x	x	x	8		
∑ x		7	9	9		7	7	9			7	9	8	8	8	8			

NAJÍZDĚCÍ DRÁHA [m]																			
		najíždí														□			
		<del>VAC</del>	VAC	VAD	VBA	<del>VBC</del>	VBD	VCA	VCB	<del>VCI</del>	<del>VBA</del>	VDB	VDC	PA	PB		PC	PD	
vyklizuje	<del>VAC</del>																		
	VAC		x	x	x		17	x	x			11	11	0	x	0	x	7	
	VAD		x	x	x		20	x	x			x	x	0	x	x	0	9	
	VBA		x	x	x		x	20	x			x	x	0	0	x	x	9	
	<del>VBC</del>																		
	VBD		11	11	x		x	17	x			x	x	x	0	x	0	7	
	VCA		x	x	11		11	x	x			17	x	0	x	0	x	7	
	VCB		x	x	x		x	x	x			20	x	x	0	0	x	9	
	<del>VCI</del>																		
	<del>VBA</del>																		
	VDB		17	x	x		x	11	11			x	x	x	0	x	0	7	
	VDC		20	x	x		x	x	x			x	x	x	x	0	0	9	
	PA		2	2	18		x	28	x			x	x	x	x	x	x	8	
	PB		x	x	2		2	x	18			28	x	x	x	x	x	8	
PC		28	x	x		x	2	2			x	18	x	x	x	x	8		
PD		x	18	x		28	x	x			2	2	x	x	x	x	8		
□		7	9	9		7	7	9			7	9	8	8	8	8			

VYKLIZOVACÍ DOBA [s]																		
	rychlost [km/h]	najíždí																
		<del>VAC</del>	VAC	VAD	VBA	<del>VBC</del>	VBD	VCA	VCB	<del>VCI</del>	<del>VBA</del>	VDB	VDC	PA	PB		PC	PD
vyklizuje	<del>VAC</del>																	
	VAC	35	x	x	x		2,0	x	x			2,5	2,8	1,0	x	3,3	x	
	VAD	25	x	x	x		2,7	x	x			x	x	1,4	x	x	3,4	
	VBA	25	x	x	x		x	2,7	x			x	x	3,4	1,4	x	x	
	<del>VBC</del>																	
	VBD	35	2,5	2,8	x		x	2,0	x			x	x	x	1,0	x	3,3	
	VCA	35	x	x	2,8		2,5	x	x			2,0	x	3,3	x	1,0	x	
	VCB	25	x	x	x		x	x	x			2,7	x	x	3,4	1,4	x	
	<del>VCI</del>																	
	<del>VBA</del>																	
	VDB	35	2,0	x	x		x	2,5	2,8			x	x	x	3,3	x	1,0	
	VDC	25	2,7	x	x		x	x	x			x	x	x	x	3,4	1,4	
	PA	5	7,6	7,6	7,6		x	7,6	x			x	x	x	x	x	x	
	PB	5	x	x	7,6		7,6	x	7,6			7,6	x	x	x	x	x	
PC	5	7,6	x	x		x	7,6	7,6			x	7,6	x	x	x	x		
PD	5	x	7,6	x		7,6	x	x			7,6	7,6	x	x	x	x		

		NAJÍZDĚCÍ DOBA [s]																
		rychlost [km/h]	najíždí															
			<del>VAB</del>	VAC	VAD	VBA	<del>VBC</del>	VBD	VCA	VCB	<del>VCD</del>	<del>VCA</del>	VDB	VDC	PA	PB	PC	PD
			25	35	25	25	25	35	35	25	25	25	35	25	5	5	5	5
vyklizuje	<del>VAB</del>																	
	VAC		x	x	x		1,5	x	x				1,0	1,4	0,0	x	0,0	x
	VAD		x	x	x		1,8	x	x				x	x	0,0	x	x	0,0
	VBA		x	x	x		x	1,8	x				x	x	0,0	0,0	x	x
	<del>VBC</del>																	
	VBD		1,0	1,4	x		x	1,5	x				x	x	x	0,0	x	0,0
	VCA		x	x	1,4		1,0	x	x				1,5	x	0,0	x	0,0	x
	VCB		x	x	x		x	x	x				1,8	x	x	0,0	0,0	x
	<del>VCD</del>																	
	<del>VCA</del>																	
	VDB		1,5	x	x		x	1,0	1,4				x	x	x	0,0	x	0,0
	VDC		1,8	x	x		x	x	x				x	x	x	x	0,0	0,0
	PA		0,2	0,3	2,3		x	2,5	x				x	x	x	x	x	x
	PB		x	x	0,3		0,2	x	2,3				2,5	x	x	x	x	x
PC		2,5	x	x		x	0,2	0,3				x	2,3	x	x	x	x	
PD		x	2,3	x		2,5	x	x				0,2	0,3	x	x	x	x	

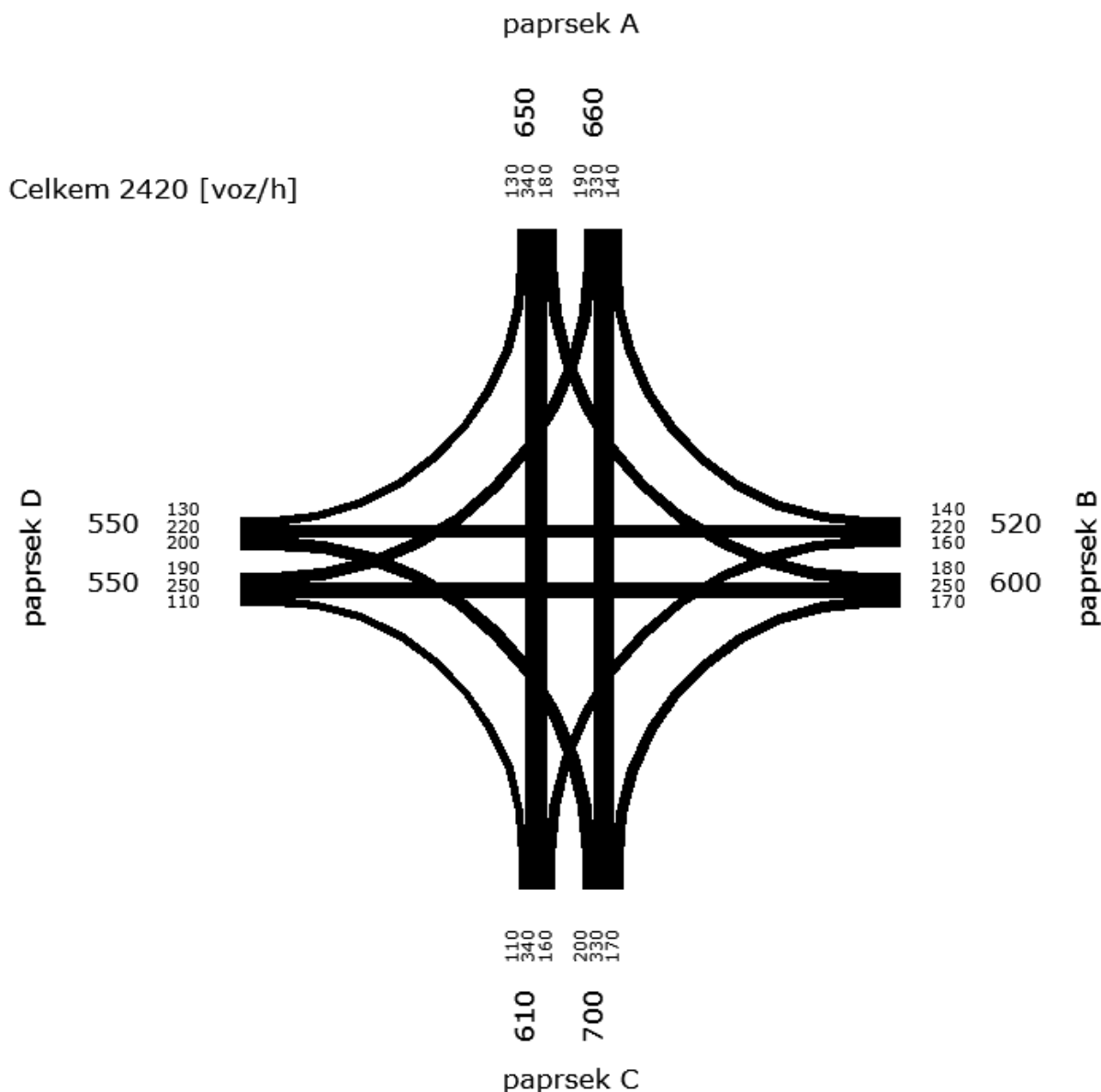
		MEZIČAS [s]																
		bezpečn. odstup [s]	najíždí															
			<del>VAB</del>	VAC	VAD	VBA	<del>VBC</del>	VBD	VCA	VCB	<del>VCD</del>	<del>VCA</del>	VDB	VDC	PA	PB	PC	PD
vyklizuje	<del>VAB</del>																	
	VAC	2	x	x	x		2	x	x				4	3	3	x	5	x
	VAD	2	x	x	x		3	x	x				x	x	3	x	x	5
	VBA	2	x	x	x		x	3	x				x	x	5	3	x	x
	<del>VBC</del>																	
	VBD	2	4	3	x		x	2	x				x	x	x	3	x	5
	VCA	2	x	x	3		4	x	x				2	x	5	x	3	x
	VCB	2	x	x	x		x	x	x				3	x	x	5	3	x
	<del>VCD</del>																	
	<del>VCA</del>																	
	VDB	2	2	x	x		x	4	3				x	x	x	5	x	3
	VDC	2	3	x	x		x	x	x				x	x	x	x	5	3
	PA	0	7	7	5		x	5	x				x	x	x	x	x	x
	PB	0	x	x	7		7	x	5				5	x	x	x	x	x
PC	0	5	x	x		x	7	7				x	5	x	x	x	x	
PD	0	x	5	x		5	x	x				7	7	x	x	x	x	

I při zákazů levých odbočení se pohybují mezičasy ve stejných mezích, jako při původním uspořádání. Celková kolizní plocha křižovatky zůstala stejná, takže není důvod k výrazné změně mezičasů, které jsou tak ovlivněny pouze vynecháním levých odbočení s nižší rychlostí a dlouhou kolizní plochou způsobenou ostrým úhlem trajektorií vozidel.

Signální plán je vytvořen dle kap. 7.5.2, kde je také popsán. Dalším krokem je výpočet dob zelených podle podílu intenzit. Pro potřeby výpočtu je nezbytné mít konkrétní zatížení, proto náhodně volíme:

z   do	A	B	C	D	$\Sigma$
<b>A</b>		180	340	130	650
<b>B</b>	140		160	220	520
<b>C</b>	330	170		200	700
<b>D</b>	190	250	110		550
$\Sigma$	660	600	610	550	2420

Pro snazší orientaci nejsou intenzity žádných dvou křižovatkových pohybů totožné.



Pozn. Pentlogram vytvořen s využitím algoritmu Ing. Martina Nováka.

Základní parametry návrhu jsou:

Doba cyklu	$C = 80 \text{ s}$
Mezičas	$M = 4 \text{ s}$
Počet mezičasů v cyklu	$PM = 4$
Základní saturovaný tok	$S = 2000 \text{ voz/h}$

Dobu cyklu rozdělíme mezi dvě hlavní fáze. Z univerzálního schématu fází je patrné, že za celou dobu cyklu nastanou čtyři mezičasy, které od doby cyklu odečteme.

intenzita ve fázi 1:

$$I_{F,1} = 1070 \text{ voz/h} (190 + 250 + 110 + 140 + 160 + 220)$$

intenzita ve fázi 2:

$$I_{F,2} = 1350 \text{ voz/h} (180 + 340 + 130 + 330 + 170 + 200)$$

délka zelené fáze 1 (zaokrouhlená na celé číslo):

$$Z_{F,1} = I_{F,1} * (C - P_M * M) / (I_{F,1} + I_{F,2}) = 1070 * (80 - 4 * 4) / (1070 + 1350) = 28 \text{ s}$$

délka zelené fáze 2:

$$Z_{F,2} = C - P_M M - Z_1 = 80 - 4 * 4 - 28 = 36 \text{ s}$$

Žádná z fází není kratší než 10 s, takže nemusíme výsledek opravovat. Pokud by vyšla doba 1. fáze např. 8 s a doba 2. fáze 56 s, dle vztahů 7.4 a 7.5 v kap. 7.5.2 by se délka 1. fáze zvýšila na požadovaných 10 s a délka 2. fáze zkrátila na zbylých 54 s.

Snadnou kontrolou můžeme zjistit, že podíly intenzit jsou 44 % ku 56 %; podíly dob zelených jsou rovněž 44 ku 56, takže rozdělení doby zelené je v pořádku.

Dalším krokem je rozdělení doby zelené každé z hlavních fází. Zde již zohledníme počet řadicích pruhů.

Víme, že zatížení je:

$$I_{VAB} = 180 \text{ voz/h}$$

$$I_{VCA+VBC} = 500 \text{ voz/h}$$

Počet řadicích pruhů je:

$$PP_{VAB} = 1 \text{ pruh}$$

$$PP_{VCA+VBC} = 1 \text{ pruh}$$

Doba zelené se spočte (a zaokrouhlí na celé číslo):

$$Z_{VAB} = I_{VAB} / PP_{VAB} * Z_{F,2} / (I_{VAB} / PP_{VAB} + I_{VCA+VBC} / PP_{VCA+VBC}) = 180 / 1 * 36 / (180 / 1 + 500 / 1) = 9 \text{ s}$$

$$Z_{VCA+VBC} = Z_{F,2} - Z_{VAB} = 36 - 9 = 27 \text{ s}$$

Pro další dvojice kolizních pohybů pak analogicky:

$I_{VBC} = 160 \text{ voz/h}$	$PP_{VBC} = 1 \text{ pruh}$	$Z_{VBC} = 9 \text{ s}$
$I_{VDB+VDC} = 360 \text{ voz/h}$	$PP_{VDB+VDC} = 1 \text{ pruh}$	$Z_{VDB+VDC} = 19 \text{ s}$
$I_{VCD} = 200 \text{ voz/h}$	$PP_{VCD} = 1 \text{ pruh}$	$Z_{VCD} = 11 \text{ s}$
$I_{VAC+VAD} = 470 \text{ voz/h}$	$PP_{VAC+VAD} = 1 \text{ pruh}$	$Z_{VAC+VAD} = 25 \text{ s}$
$I_{VDA} = 190 \text{ voz/h}$	$PP_{VDA} = 1 \text{ pruh}$	$Z_{VDA} = 10 \text{ s}$
$I_{VBA+VBD} = 360 \text{ voz/h}$	$PP_{VBA+VBD} = 1 \text{ pruh}$	$Z_{VBA+VBD} = 19 \text{ s}$

Signální plán je tímto navržen a můžeme přistoupit k jeho posouzení. Prvním krokem výpočtu bude určení saturovaného toku, který závisí na poloměru odbočení, podílu odbočujících vozidel a sklonu nivelety.

Začneme vjezdem VAB. Z geometrie víme:

poloměr oblouku:	$R_{VAB} = 17,5 \text{ m}$
počet řadicích pruhů:	$PP_{VAB} = 1 \text{ pruh}$
podíl odbočujících vozidel:	$f_{VAB} = 1$

Poté můžeme počítat:

koeficient oblouku:  $k_{obl,VAB} = R_{VAB} / (R_{VAB} + 1,5 * f_{VAB}) = 17,5 / (17,5 + 1,5 * 1) = 0,92$   
 koeficient sklonu:  $k_{skl,VAB} = 1,00$  (předpokládáme nulový sklon nivelety)

saturovaný tok:  $ST_{VAB} = k_{obl,VAB} * k_{skl,VAB} * S_{zákl} * PP_{VAB} = 0,92 * 1,00 * 2000 * 1 = 1842 \text{ voz/h}$

kapacita:  $K_{VAB} = ST_{VAB} * Z_{VAB} / C = 1842 * 9 / 80 = 207 \text{ voz/hod}$

Nyní lze stanovit, zda byla či nebyla překročena kapacita, což v tomto případě nebyla.

$I_{VAB} = 180 < K_{VAB} = 207$

Pokračujeme výpočtem rezervy kapacity, doby zdržení a délky fronty. Pro algoritmus potřebujeme pouze dobu zdržení, ale pro ukázkou dopočítáme i zbylé dva parametry.

Rezerva kapacity:

$R_{VAB} = 1 - I_{VAB} / K_{VAB} = 1 - 180 / 207 = 0,13$

Doba zdržení:

$t_{w,VAB} = 0,45 * ((C - Z)^2 * K / (K * C - I * Z) + I * 3600 / (K^2 - I * K)) =$   
 $= 0,45 * ((80 - 9)^2 * 207 / (207 * 80 - 180 * 9) + 180 * 3600 / (207^2 - 180 * 207)) =$   
 $= 83 \text{ s}$

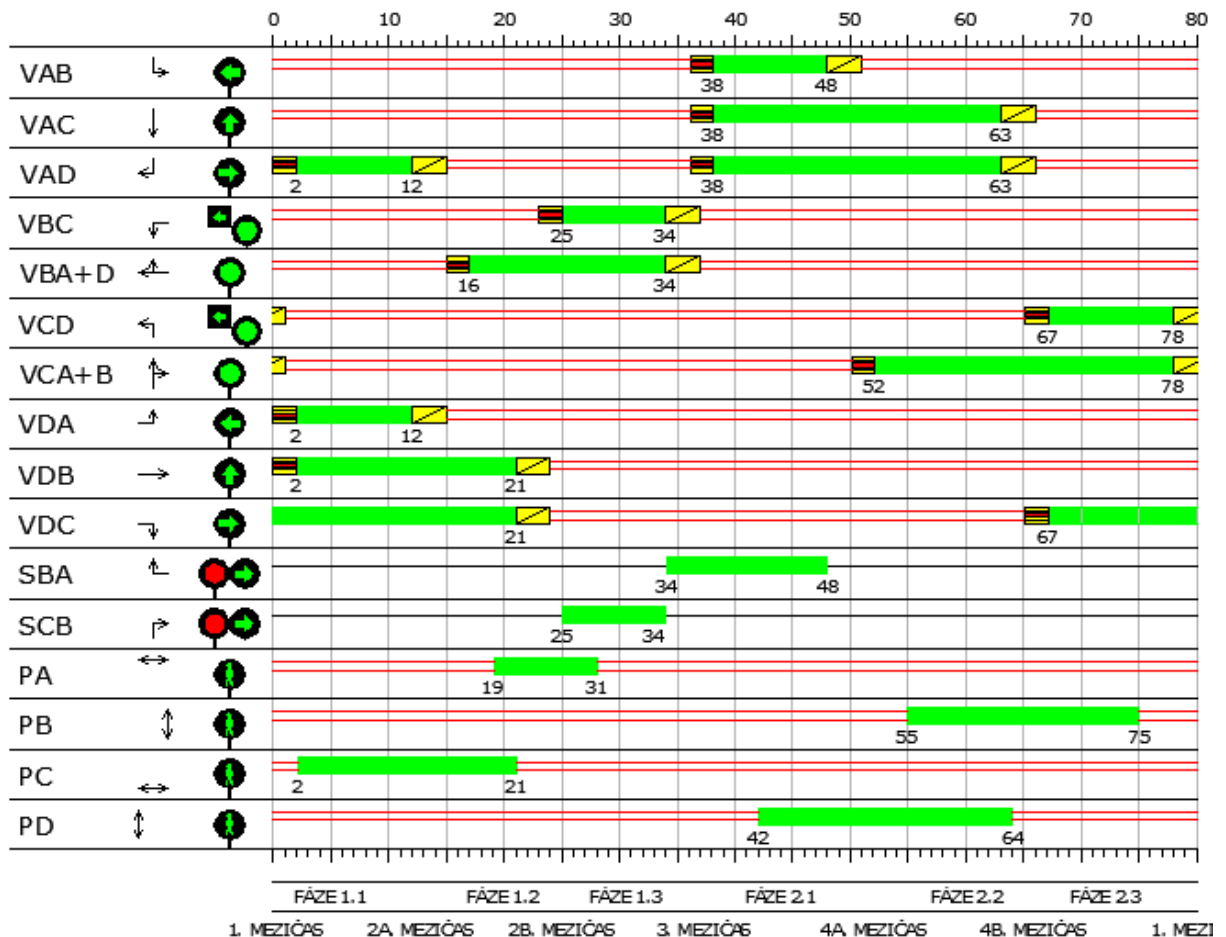
Toto zdržení odpovídá ÚKD E.

Délka fronty:

$$DF_{VAB} = 6 * (C - Z) * I / (PP * 3600) = 6 * (80 - 9) * 180 / (1 * 3600) = 21 \text{ m}$$

Výpočet dalších vjezdů je prováděn analogicky – průběžné výsledky jsou v přehledné tabulce:

	poloměr odbočení	počet pruhů	podíl odboč.	koeficient oblouku	koeficient sklonu	saturov. tok	doba zelené	kapacita	intenzita	rezerva kapacity	doba zdržení	ÚKD	fronta
	R	PP	f	Kobl	kskl	ST	Z	K	I	R	tw		DF
	[m]	[pruh]	[-]	[-]	[-]	[voz/h]	[s]	[voz/h]	[voz/h]	[-]	[s]	[A÷F]	[m]
VAB	17,5	1	1,00	0,92	1,00	1842	10	230	180	22%	56	D	21
VCA a VCB	2,5	1	0,34	0,83	1,00	1661	26	540	500	7%	61	D	45
VBC	17,5	1	1,00	0,92	1,00	1842	9	207	160	23%	58	D	19
VDB a VDC	2,5	1	0,31	0,85	1,00	1690	19	401	360	10%	62	D	37
VCD	17,5	1	1,00	0,92	1,00	1842	11	247	200	19%	58	D	23
VAC a VAD	2,5	1	0,28	0,86	1,00	1715	25	541	470	13%	43	C	43
VDA	17,5	1	1,00	0,92	1,00	1842	10	223	190	15%	73	E	22
VBA a VBD	2,5	1	0,39	0,81	1,00	1622	18	371	360	3%	164	E	37



Výpočet pro variantu křižovatky se zakázaným levým odbočením (zakázanými levými odbočeními) je analogický – nejvyšší odlišnost je při dělení doby zelené hlavní fáze mezi navzájem kolizní vjezdy. Vypadnuvší vjezd pro levé odbočení umožní prodloužit dobu zelené protisměrného vjezdu přímo a vpravo na celou dobu zelené hlavní fáze (viz obr. 7-16). Protože tím vypadne jeden mezičas, je korektní k době zelené počítající se základními čtyřmi mezičasy v cyklu tento jeden mezičas přičíst; odečíst mezičas již při dělení doby zelené mezi hlav-



ní fáze není obecně možné, protože čtvrtý mezičas odpadá jen u části vjezdů – jen u těch, u kterých je protisměrné kolizní levé odbočení zakázáno.



## PŘÍLOHA C: ZDROJOVÝ KÓD OPTIMALIZAČNÍHO ALGORITMU V JAZYCE VBA

Pro představu je zde přiložen zdrojový kód programu, kterým byl realizován optimalizační algoritmus.

```
Sub Model1 ()

Dim PoleUzel(1 To 50, 1 To 4) As Integer '1 X, 2 Y, 3 Xnenáhodné, 4 Ynená-
    hodné
Dim PoleUzel2(1 To 100, 1 To 2) As Integer '1 X, 2 Y .. uzly předělané z
    hran
Dim PoleHrana(1 To 100, 1 To 5) As Single '1 První uzel, 2 druhý uzel, 3
    délka [m], 4 Xtěžiště, 5 Ytěžiště
Dim PoleHrana2(1 To 900, 1 To 8) As Long '1 První uzel2, 2 druhý uzel2, 3
    křižovatkový pohyb, 4 nahrazený uzel1, 5 doba zdržení, 6 intenzi-
    ta, 7 celkovéZdržení
Dim PoleSSZ() As Integer '1 až 12 intenzity křižovatkových pohybů, 13 cel-
    ková intenzita, 14 až 25 tz pro křižovatkové pohyby, 26 délka
    cyklu, 27-38 tw, 40-51 číslo hrany2
'Dim PoleDijkstra(1 To 1000, 1 To 3) As Single 'Podkroky Dijkstrova algo-
    ritmu; 1 a 2 jsou uzly 1 a 2, 3 délka
Dim PoleDijkstraZamek() As Byte
Dim PoleVzdalenosti(1 To 60, 1 To 60) As Integer 'Matice vzdáleností mezi
    uzly
Dim PoleTrasa() As Byte 'Příslušnost hrany k trase mezi dvojicí uzlů
Dim PoleZakaz() As Byte 'Pole zakazů
Dim PoleZdrzeni() As Integer 'iterace zatížení, iterace genetického algo-
    ritmu
Dim PolePoradi(1 To 255) As Byte 'pořadí jedinců dle doby zdržení - hodnota
    odkazuje na ID jedince
Dim PoleKrizeni() As Byte 'zápis proběhlých křížení
Dim PoleUjeteDrahy(0 To 50, 0 To 50, 0 To 60) As Long 'součet ujetých drah
    - 1 Simulace, 2 Generace, 3 Jedinec

Dim PocetUzlu As Integer ' Počet uzlů, které chci vytvořit
Dim CisloHrany, PocetHran, NejkratsiHrana, CisloUzlu As Integer
Dim CisloHranyN, CisloHranyZ, PocetHranZ As Byte

Dim LosKrizeni, LosMutace As Single

Dim DobaZdrzeni, Intenzita, Kapacita, Krok, NejblizsiUzel, PrubeznyUzel,
    SatTok, SoucetIntenzit, Uzel, VychoziiUzel, VzdalenostD As Integer
Dim A, B, C, M, N, IA, IB As Integer
Dim tA, tB, DobaZelene, Cyklus, Mezicas, TypKrizovatky, MinimalniZelena As
    Byte
Dim JedinecDoRulety, JedinecKeKrizeni, NovyJedinec, Otec, Matka, ZdrzeniMin
    As Integer
Dim SatTok1, SatTok2 As Integer

Dim Dvojice, Los, PocetIteraci, IteraceCesta, PocetZakazu As Byte
```



```
' VYTVOŘENÍ SÍTĚ
```

```
' Vytvoření uzlů
```

```
PocetUzlu = 45  
For CisloUzlu = 1 To PocetUzlu  
    PoleUzel(CisloUzlu, 3) = Sheets("Network").Cells(4 + CisloUzlu, 2).Value  
    PoleUzel(CisloUzlu, 1) = PoleUzel(CisloUzlu, 3) + Rnd * 300 - 150  
    PoleUzel(CisloUzlu, 4) = Sheets("Network").Cells(4 + CisloUzlu, 3).Value  
    PoleUzel(CisloUzlu, 2) = PoleUzel(CisloUzlu, 4) + Rnd * 300 - 150  
    Sheets("Network").Cells(4 + CisloUzlu, 4).Value = PoleUzel(CisloUzlu, 1)  
    Sheets("Network").Cells(4 + CisloUzlu, 5).Value = PoleUzel(CisloUzlu, 2)  
    '''Print #1, PoleUzel(CisloUzlu, 1) & vbTab & PoleUzel(CisloUzlu, 2) &  
        vbTab & CisloUzlu  
Next
```

```
' ..Vytvoření hran
```

```
PocetHran = 60  
For CisloHrany = 1 To PocetHran  
    PoleHrana(CisloHrany, 1) = Sheets("Network").Cells(4 + CisloHrany,  
        8).Value  
    PoleHrana(CisloHrany, 2) = Sheets("Network").Cells(4 + CisloHrany,  
        9).Value  
    X1 = PoleUzel(PoleHrana(CisloHrany, 1), 1)  
    Y1 = PoleUzel(PoleHrana(CisloHrany, 1), 2)  
    X2 = PoleUzel(PoleHrana(CisloHrany, 2), 1)  
    Y2 = PoleUzel(PoleHrana(CisloHrany, 2), 2)  
    PoleHrana(CisloHrany, 3) = Sqr((X2 - X1) * (X2 - X1) + (Y2 - Y1) * (Y2  
        - Y1))  
    PoleHrana(CisloHrany, 4) = (X1 + X2) / 2  
    PoleHrana(CisloHrany, 5) = (Y1 + Y2) / 2  
    Sheets("Network").Cells(4 + CisloHrany, 10).Value = PoleHra-  
        na(CisloHrany, 3)  
Next
```

```
' ..Převedení hran na uzly
```

```
For CisloHrany = 1 To PocetHran  
    PoleUzel2(CisloHrany, 1) = PoleHrana(CisloHrany, 4)  
    PoleUzel2(CisloHrany, 2) = PoleHrana(CisloHrany, 5)  
    Sheets("Network").Cells(4 + CisloHrany, 13).Value = PoleU-  
        zel2(CisloHrany, 1)  
    Sheets("Network").Cells(4 + CisloHrany, 14).Value = PoleU-  
        zel2(CisloHrany, 2)  
Next
```

```
PocetUzlu2 = PocetHran
```

```
' ..Spojení nových uzlů
```

```
CisloUzlu = 1  
Hrana2 = 1
```



```
For CisloUzlu = 1 To PocetUzlu
  Krizovatka = Sheets("Network").Cells(4 + CisloUzlu, 6).Value
  If Krizovatka > 0 Then

    For Hrana = 1 To PocetHran
      If PoleHrana(Hrana, 2) = CisloUzlu And PoleHrana(Hrana, 1) <> Cis-
        loUzlu - 1 Then
        UzelU = Hrana
      End If
    Next

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU + 5
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 1 ' křižovatkový pohyb
    PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
    Hrana2 = Hrana2 + 1

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU + 5
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU + 6
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 2 ' křižovatkový pohyb
    PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
    Hrana2 = Hrana2 + 1

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU + 5
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU + 11
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 3 ' křižovatkový pohyb
    PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
    Hrana2 = Hrana2 + 1

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU + 11
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU + 5
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 4 ' křižovatkový pohyb
    PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
    Hrana2 = Hrana2 + 1

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU + 11
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 5 ' křižovatkový pohyb
    PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
    Hrana2 = Hrana2 + 1

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU + 11
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU + 6
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 6 ' křižovatkový pohyb
    PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
    Hrana2 = Hrana2 + 1

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU + 6
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU + 11
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 7 ' křižovatkový pohyb
    PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
    Hrana2 = Hrana2 + 1

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU + 6
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU + 5
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 8 ' křižovatkový pohyb
    PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
    Hrana2 = Hrana2 + 1

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU + 6
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 9 ' křižovatkový pohyb
    PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
    Hrana2 = Hrana2 + 1

    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU
    PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU + 6
    PoleHrana2(Hrana2, 3) = 10 ' křižovatkový pohyb
```



```
PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
Hrana2 = Hrana2 + 1
    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU
PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU + 11
PoleHrana2(Hrana2, 3) = 11 ' křižovatkový pohyb
PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
Hrana2 = Hrana2 + 1
    PoleHrana2(Hrana2, 1) = UzelU
PoleHrana2(Hrana2, 2) = UzelU + 5
PoleHrana2(Hrana2, 3) = 12 ' křižovatkový pohyb
PoleHrana2(Hrana2, 4) = CisloUzlu
Hrana2 = Hrana2 + 1
End If
Next
PocetHran2 = Hrana2 - 1

For CisloHrany = 1 To PocetHran2
    Sheets("Network").Cells(4 + CisloHrany, 17).Value = PoleHrana2(CisloHrany, 1)
    Sheets("Network").Cells(4 + CisloHrany, 18).Value = PoleHrana2(CisloHrany, 2)
    Sheets("Network").Cells(4 + CisloHrany, 20).Value = PoleHrana2(CisloHrany, 3)
    Sheets("Network").Cells(4 + CisloHrany, 20).Value = PoleHrana2(CisloHrany, 4)
Next

For CisloHrany = 1 To PocetHran2

    X1 = PoleUzel2(PoleHrana2(CisloHrany, 1), 1)
    Y1 = PoleUzel2(PoleHrana2(CisloHrany, 1), 2)
    X2 = PoleUzel2(PoleHrana2(CisloHrany, 2), 1)
    Y2 = PoleUzel2(PoleHrana2(CisloHrany, 2), 2)
Next

' **** VÝPOČET SIMULACÍ (RŮZNÉ VARIANTY DOPRAVNÍHO ZATÍŽENÍ A VÝCHOZÍCH ZÁKAZŮ) ****

For Simulace = 0 To 10

' ** DEFAULTNÍ HODNOTY **

PocetIteraci = 10

'ZÁKLADNÍ NASTAVENÍ OPTIMALIZACE! * * * *

PocetJedincu = 60
PocetGeneraci = 20

ReDim PoleZakaz(0 To PocetGeneraci + 1, 1 To PocetJedincu, 1 To 181) As Byte
    te 'Pole zakazů
ReDim PoleZdrzeni(0 To PocetGeneraci, 1 To PocetJedincu, 1 To PocetIteraci)
    'Pole zdržení

'Zatížení sítě
For CisloHrany = 1 To PocetHran2
```



```
PoleHrana2(CisloHrany, 5) = PoleHrana(PoleHrana2(CisloHrany, 1), 3) /
    13.9 'Doba jízdy 50km rychlostí
Next

' ** DOPRAVNÍ ZATÍŽENÍ **

' Matice dopravních vztahů

Dim ODMatrix(1 To 60, 1 To 60) As Byte

VozidelCelkem = 5000 'Počet vozidel (jízdy vozidel) v síti
PocetJezdMeziDvemaUzly = VozidelCelkem / (PocetUzlu2 * PocetUzlu2 - PocetUzlu2)
KazdaXtaDvojice = Round(PocetIteraci / PocetJezdMeziDvemaUzly, 0)
For UzelA = 1 To PocetUzlu2
    For UzelB = 1 To PocetUzlu2
        If UzelA <> UzelB Then
            Nahoda = Round(Rnd() * KazdaXtaDvojice, 0)
            If Nahoda = KazdaXtaDvojice Then
                ODMatrix(UzelA, UzelB) = PocetIteraci
            Else
                ODMatrix(UzelA, UzelB) = 0
            End If
        Else
            ODMatrix(UzelA, UzelB) = 0
        End If
        Sheets("ODMatrix").Cells(UzelA + 2, UzelB + 1).Value = ODMatrix(UzelA,
            UzelB)
    Next
Next
Next

'Zakázané hrany => Nultá generace = náhodná generace
For Jedinec = 4 To PocetJedincu
    For Dvojice = 1 To 180
        Randomize
        Los = Round(Rnd * 15, 0)
        If Los = 1 Then
            PoleZakaz(0, Jedinec, Dvojice) = 0
        Else
            PoleZakaz(0, Jedinec, Dvojice) = 1
        End If
    Next
Next
Next

For X = 1 To 180 'Speciální případy pro jedince 1 až 2
    PoleZakaz(0, 1, X) = 0 'Všechna levá odbočení povolena
    PoleZakaz(0, 2, X) = 1 'Všechna levá odbočení zakázána
Next

' **** VÝPOČET GENERACÍ (VARIANTY ZÁKAZŮ) ****

For Generace = 0 To PocetGeneraci

' **** VÝPOČET JEDINCŮ (VARIANTY ZÁKAZŮ) ****
```



```
For Jedinec = 1 To PocetJedincu

For A = 1 To PocetHran2 'Vynulování intenzit
  PoleHrana2(A, 5) = 0
  PoleHrana2(A, 6) = 0
  PoleHrana2(A, 7) = 0
Next

' **** ITERACE ZATÍŽENÍ SÍŤE OPAKOVANÝM HLEDÁNÍM NEJKRATŠÍ CESTY ****

'IteraceCesta = 1
For IteraceCesta = 1 To PocetIteraci

' ** DIJKSTRA **

'vyplnění matice vzdáleností maximální hodnotou
For M = 1 To PocetUzlu2
  For N = 1 To PocetUzlu2
    PoleVzdalenosti(M, N) = 32750
  Next
Next

ReDim PoleTrasa(1 To 60, 1 To 60, 1 To 310) As Byte
ReDim PoleDijkstraZamek(1 To 60, 1 To 60) As Byte

PodKrokD = 1
For VychoziUzel = 1 To PocetUzlu2
  NejblizsiUzel = VychoziUzel
  VzdalenostD = 0

  For KrokD = 1 To PocetUzlu2 - 1

    PrubeznyUzel = NejblizsiUzel
    PrubeznaVzdalenost = VzdalenostD
    PoleDijkstraZamek(VychoziUzel, PrubeznyUzel) = 1
    VzdalenostD = 32750

    For HranaD = 1 To PocetHran2

      If PoleHrana2(HranaD, 1) = PrubeznyUzel Then

        SousedniUzel = PoleHrana2(HranaD, 2)

        PodKrokD = PodKrokD + 1

        If PoleVzdalenosti(VychoziUzel, SousedniUzel) > PoleHrana2(HranaD,
          5) + PrubeznaVzdalenost And PoleDijkstraZamek(VychoziUzel, SousedniUzel) = 0 Then
          PoleVzdalenosti(VychoziUzel, SousedniUzel) = PoleHrana2(HranaD,
            5) + PrubeznaVzdalenost
          For T = 1 To PocetHran2
            PoleTrasa(VychoziUzel, SousedniUzel, T) = PoleTrasa(VychoziUzel, PrubeznyUzel, T)
          Next
          PoleTrasa(VychoziUzel, SousedniUzel, HranaD) = 1
        End If
      End If
    End For
  Next
End For
```



```
For O = 1 To PocetUzlu2 'Najití dosud nezamčeného nejbližšího uzlu
  If PoleVzdalenosti(VychoziUzel, O) < VzdalenostD And Pole-
    DijkstraZamek(VychoziUzel, O) = 0 Then
    VzdalenostD = PoleVzdalenosti(VychoziUzel, O)
    NejblizsiUzel = O
  End If
Next

End If
Next
Next
Next

'ODPOR - doba zdržení

'světelně řízená křižovatka

ReDim PoleSSZ(1 To 45, 1 To 51)

Cyklus = 80 'stanovení zvolené délky cyklu
Mezicas = 4 'zadání mezičasu
SatTok = 2000 'zadání základního satureovaného toku
SatTok2 = SatTok * 0.92 ' viz TP 235
MinimalniZelena = 5
Polomer1 = 3

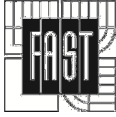
For Uzel = 1 To PocetUzlu
  TypKrizovatky = Sheets("Network").Cells(4 + Uzel, 6).Value
  If TypKrizovatky = 1 Then

    For Hrana2 = 1 To 300
      If PoleHrana2(Hrana2, 4) = Uzel Then
        SoucetIntenzit = SoucetIntenzit + PoleHrana2(Hrana2, 6)
        PoleSSZ(Uzel, PoleHrana2(Hrana2, 3)) = PoleHrana2(Hrana2, 6)
        '''Sheets("Krizovatka").Cells(Uzel + 4, PoleHrana2(Hrana2, 3) +
          1) = PoleHrana2(Hrana2, 6)
        PoleSSZ(Uzel, PoleHrana2(Hrana2, 3) + 39) = Hrana2
        '''Sheets("Krizovatka").Cells(Uzel + 4, PoleHrana2(Hrana2, 3) +
          40) = Hrana2
      End If
    Next

    SoucetIntenzit = SoucetIntenzit / 100
    PoleSSZ(Uzel, 13) = SoucetIntenzit
    '''Sheets("Krizovatka").Cells(Uzel + 4, 14).Value = SoucetIntenzit
    SoucetIntenzit = 0

    IA = Application.Max(PoleSSZ(Uzel, 1) + PoleSSZ(Uzel, 8) + Po-
      leSSZ(Uzel, 9), PoleSSZ(Uzel, 7) + PoleSSZ(Uzel, 2) +
      PoleSSZ(Uzel, 3))
    IB = Application.Max(PoleSSZ(Uzel, 10) + PoleSSZ(Uzel, 5) + Po-
      leSSZ(Uzel, 6), PoleSSZ(Uzel, 4) + PoleSSZ(Uzel, 12) +
      PoleSSZ(Uzel, 11))
    tA = IA * (Cyklus - 4 * Mezicas) / (IA + IB + 0.001)
    tB = IB * (Cyklus - 4 * Mezicas) / (IA + IB + 0.001)
    If tA < MinimalniZelena Then 'Vložení minimální délky zelené
```





```
tB = tB - MinimalniZelena + tA
tA = MinimalniZelena
End If
If tB < MinimalniZelena Then 'Vložení minimální délky zelené
  tA = tA - MinimalniZelena + tB
  tB = MinimalniZelena
End If

PoleSSZ(Uzel, 14) = Application.Min(Application.Max(PoleSSZ(Uzel, 1)
  * tA / (PoleSSZ(Uzel, 1) + PoleSSZ(Uzel, 8) + PoleSSZ(Uzel, 9) + 0.001), 5), tA - 5) ' rozdělení doby
  zelené
PoleSSZ(Uzel, 21) = tA - PoleSSZ(Uzel, 14)
PoleSSZ(Uzel, 20) = Application.Min(Application.Max(PoleSSZ(Uzel, 7)
  * tA / (PoleSSZ(Uzel, 7) + PoleSSZ(Uzel, 2) + PoleSSZ(Uzel, 3) + 0.001), 5), tA - 5)
PoleSSZ(Uzel, 15) = tA - PoleSSZ(Uzel, 20)
PoleSSZ(Uzel, 17) = Application.Min(Application.Max(PoleSSZ(Uzel, 4)
  * tB / (PoleSSZ(Uzel, 4) + PoleSSZ(Uzel, 11) + PoleSSZ(Uzel, 12) + 0.001), 5), tB - 5)
PoleSSZ(Uzel, 24) = tB - PoleSSZ(Uzel, 17)
PoleSSZ(Uzel, 23) = Application.Min(Application.Max(PoleSSZ(Uzel, 10)
  * tB / (PoleSSZ(Uzel, 10) + PoleSSZ(Uzel, 5) + PoleSSZ(Uzel, 6) + 0.001), 5), tB - 5)
PoleSSZ(Uzel, 18) = tB - PoleSSZ(Uzel, 23)

If PoleZakaz(Generace, Jedinec, 4 * Uzel) = 1 Then 'rozdělení doby
  zelené pro případ zakázaného křižovatkového pohybu
  PoleSSZ(Uzel, 21) = 0
  PoleSSZ(Uzel, 14) = Cyklus
End If
If PoleZakaz(Generace, Jedinec, 4 * Uzel - 1) = 1 Then 'rozdělení doby
  zelené pro případ zakázaného křižovatkového pohybu
  PoleSSZ(Uzel, 20) = 0
  PoleSSZ(Uzel, 15) = Cyklus
End If
If PoleZakaz(Generace, Jedinec, 4 * Uzel - 2) = 1 Then 'rozdělení doby
  zelené pro případ zakázaného křižovatkového pohybu
  PoleSSZ(Uzel, 17) = 0
  PoleSSZ(Uzel, 24) = Cyklus
End If
If PoleZakaz(Generace, Jedinec, 4 * Uzel - 3) = 1 Then 'rozdělení doby
  zelené pro případ zakázaného křižovatkového pohybu
  PoleSSZ(Uzel, 23) = 0
  PoleSSZ(Uzel, 18) = Cyklus
End If

Krok = 0 'Kapacita a doba zdržení levých odbočení, tzn č. 1, 4, 7 a 10
Do Until Krok = 12
  DobaZelene = PoleSSZ(Uzel, 14 + Krok)
  Intenzita = PoleSSZ(Uzel, 1 + Krok)
  Kapacita = DobaZelene * SatTok2 / Cyklus
  If Kapacita > 0 And Kapacita > Intenzita + 1 And (Kapacita * Cyklus
    - Intenzita * DobaZelene) > 0 Then
    DobaZdrzeni = 0.45 * ((Cyklus - DobaZelene) ^ 2 * Kapacita / (Kapacita * Cyklus - Intenzita * DobaZelene) + Intenzita
      * 3600 / (Kapacita ^ 2 - Intenzita * Kapacita))
```



```
If DobaZdrzeni > 255 Then
    DobaZdrzeni = 255
End If
PoleSSZ(Uzel, 27 + Krok) = DobaZdrzeni
Else
    PoleSSZ(Uzel, 27 + Krok) = 255 '+ Intenzita - Kapacita
End If
Krok = Krok + 3
Loop

Krok = 1 'Kapacita a doba zdržení pravých odbočení a přímých směrů
Do Until Krok = 13
    DobaZelene = PoleSSZ(Uzel, 14 + Krok)
    Intenzita = PoleSSZ(Uzel, 1 + Krok) + PoleSSZ(Uzel, 1 + Krok + 1)
    If PoleSSZ(Uzel, 1 + Krok) > 0 And PoleSSZ(Uzel, 1 + Krok + 1) > 0
        Then
            SatTok1 = SatTok * Polomer1 / (Polomer1 + 1.5 * PoleSSZ(Uzel, 1
                + Krok) / (PoleSSZ(Uzel, 1 + Krok) + PoleSSZ(Uzel, 1 +
                Krok + 1)))
        Else
            SatTok1 = 1800
        End If
    Kapacita = DobaZelene * SatTok1 / Cyklus
    If Kapacita > 0 And Kapacita > Intenzita + 1 And (Kapacita * Cyklus
        - Intenzita * DobaZelene) > 0 Then
        DobaZdrzeni = 0.45 * ((Cyklus - DobaZelene) ^ 2 * Kapacita / (Ka-
            pacita * Cyklus - Intenzita * DobaZelene) + Intenzita
            * 3600 / (Kapacita ^ 2 - Intenzita * Kapacita))
        If DobaZdrzeni > 255 Then
            DobaZdrzeni = 255
        End If
        PoleSSZ(Uzel, 27 + Krok) = DobaZdrzeni
    Else
        PoleSSZ(Uzel, 27 + Krok) = 255 '+ Intenzita - Kapacita
    End If
    PoleSSZ(Uzel, 27 + Krok + 1) = PoleSSZ(Uzel, 27 + Krok)
    Krok = Krok + 3
Loop

For Pohyb = 1 To 12 'Přepis doby zdržení, přičtení vlivu délky a výpo-
    čet doby zdržení za všechny vozidla
    PoleHrana2(PoleSSZ(Uzel, Pohyb + 39), 5) = PoleSSZ(Uzel, Pohyb + 26)
        + PoleHrana(PoleHrana2(PoleSSZ(Uzel, Pohyb + 39), 1),
            3) / 13.9 '13,9 m/s = 50 km/h
    PoleHrana2(PoleSSZ(Uzel, Pohyb + 39), 7) = PoleHrana2(PoleSSZ(Uzel,
        Pohyb + 39), 5) * PoleHrana2(PoleSSZ(Uzel, Pohyb +
        39), 6)
    PoleZdrzeni(Generace, Jedinec, IteraceCesta) = PoleHra-
        na2(PoleSSZ(Uzel, Pohyb + 39), 7) / 3600 + PoleZdrze-
        ni(Generace, Jedinec, IteraceCesta)
Next

End If
Next

Next ' **** konec ITERACE ZATÍŽENÍ SÍTĚ OPAKOVANÝM HLEDÁNÍM NEJKRATŠÍ CESTY
****
```



```
Sheets("Genetika").Cells(Generace + 3 + 60 * Simulace, Jedinec + 4) = PoleZdrzeni(Generace, Jedinec, PocetIteraci) 'Zápis celkového zdržení

For X = 1 To 180
    Y = PoleZakaz(Generace, Jedinec, X)
    If Y > 0 Then
        PocetZakazu = PocetZakazu + 1
    End If
Next
Sheets("Genetika").Cells(Generace + 3 + 100 * Simulace, Jedinec + 64) = PocetZakazu
PocetZakazu = 0

Next ' **** konec VÝPOČTU JEDINCŮ ****

'rozmnožování

Randomize
Los = Rnd()
For JedinecRazeni = 1 To PocetJedincu 'stanovení pořadí jednotlivých jedinců dle doby zdržení
    Poradi = 1
    For JedinecRazeni2 = 1 To PocetJedincu
        If PoleZdrzeni(Generace, JedinecRazeni, PocetIteraci) > PoleZdrzeni(Generace, JedinecRazeni2, PocetIteraci) Then
            Poradi = Poradi + 1
        End If
    Next
    If Los > 0.5 Then 'připočtení jedinců se stejnou hodnotou
        For JedinecRazeni2 = 1 To JedinecRazeni
            If PoleZdrzeni(Generace, JedinecRazeni, PocetIteraci) = PoleZdrzeni(Generace, JedinecRazeni2, PocetIteraci) And JedinecRazeni <> JedinecRazeni2 Then
                Poradi = Poradi + 1
            End If
        Next
    Else
        For JedinecRazeni2 = JedinecRazeni To PocetJedincu
            If PoleZdrzeni(Generace, JedinecRazeni, PocetIteraci) = PoleZdrzeni(Generace, JedinecRazeni2, PocetIteraci) And JedinecRazeni <> JedinecRazeni2 Then
                Poradi = Poradi + 1
            End If
        Next
    End If
    PolePoradi(Poradi) = JedinecRazeni
Next

Otec = 1
Matka = 0
B = 0
ReprodukcePoradi = 1
For NoviJedinci = 1 To PocetJedincu / 2 'rozmnožování - křížení

    Randomize
    LosKrizeniReprodukce = Rnd()
```



```
If LosKrizeniReprodukce > 0.2 Then 'křížení

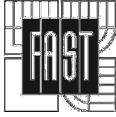
    B = B + 1 'výběr/losování rodičů
    Matka = Matka + 1
    Randomize
    Los = Rnd()
    If Los > 0.6 Then
        Matka = Matka + 1
    End If
    If B = 10 Then
        B = 1
        Matka = Otec
        Otec = Otec + 1
    End If

For Gen = 1 To 180
    Randomize
    LosKrizeni = Rnd()
    If LosKrizeni > 0.3 Then
        PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2 - 1, Gen) = Pole-
            Zakaz(Generace, Matka, Gen)
        PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2, Gen) = Pole-
            Zakaz(Generace, Otec, Gen)
    Else
        PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2 - 1, Gen) = Pole-
            Zakaz(Generace, Otec, Gen)
        PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2, Gen) = Pole-
            Zakaz(Generace, Matka, Gen)
    End If

    LosMutace = Rnd() 'mutace
    If LosMutace < 0.3 Then
        LosMutace = Round(LosMutace * 3, 0)
        If Los = 1 Then
            PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2, Gen) = 0
        Else
            PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2, Gen) = 1
        End If
    End If
    If LosMutace > 0.7 Then
        LosMutace = Round(LosMutace * 3, 0)
        If Los = 1 Then
            PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2 - 1, Gen) = 0
        Else
            PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2 - 1, Gen) = 1
        End If
    End If
Next

Else 'reprodukce

For Gen = 1 To 180
    PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2 - 1, Gen) = Pole-
        Zakaz(Generace, PolePoradi(ReprodukcePoradi), Gen)
    PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2, Gen) = PoleZakaz(Generace,
        PolePoradi(ReprodukcePoradi), Gen)
```



```
LosMutace = Rnd() 'mutace
If LosMutace < 0.1 Then
  LosMutace = Round(LosMutace * 3, 0)
  If Los = 1 Then
    PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2, Gen) = 0
  Else
    PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2, Gen) = 1
  End If
End If
If LosMutace > 1 Then
  LosMutace = Round(LosMutace * 3, 0)
  If Los = 1 Then
    PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2 - 1, Gen) = 0
  Else
    PoleZakaz(Generace + 1, NoviJedinci * 2 - 1, Gen) = 1
  End If
End If
Next

ReprodukcePoradi = ReprodukcePoradi + 1
End If

Next

Next ' **** konec VÝPOČTU GENERACÍ ****

''VÝPIS VÝSLEDKŮ

'výpočet počtu zakázaných odbočení pro optimalizovanou variantu
PocetZakazu = 0
For Gen = 1 To 180
  If PoleZakaz(Generace, PolePoradi(1), Gen) = 1 Then
    PocetZakazu = PocetZakazu + 1
  End If
Next

'výpočet počtu zakázaných odbočení pro variantu "vše povoleno"
PocetZakazuA = 0
For Gen = 1 To 180
  If PoleZakaz(1, 2, Gen) = 1 Then
    PocetZakazuA = PocetZakazuA + 1
  End If
Next

'výpočet počtu zakázaných odbočení pro variantu "vše zakázáno"
PocetZakazuB = 0
For Gen = 1 To 180
  If PoleZakaz(1, 1, Gen) = 1 Then
    PocetZakazuB = PocetZakazuB + 1
  End If
Next

Next ' **** konec VÝPOČTU SIMULACÍ ****

End Sub
```