

Akademie věd České republiky  
Ústav teorie informace a automatizace

Academy of Sciences of the Czech Republic  
Institute of Information Theory and Automation

## VÝZKUMNÁ ZPRÁVA

ING.BC. JITKA HOMOLOVÁ

### **Řízení dopravní mikrooblasti na delším horizontu**

2146

ŘÍJEN 2005

ÚTIA AVČR, P.O.Box 18, 182 08 Prague,  
Czech Republic

Fax: (+420)286890378, <http://www.utia.cas.cz>, E-mail: [utia@utia.cas.cz](mailto:utia@utia.cas.cz)



# Řízení dopravní mikrooblasti na delším horizontu

Jitka Homolová

Akademie věd České republiky, Ústav teorie informace a automatizace,  
Oddělení adaptivních systémů;

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní,  
Katedra aplikované matematiky

1. listopadu 2005

Výzkum popsáný v tomto článku byl podporován grantem MD ČR č. 1F43A/003/120  
a grantem MŠMT ČR č. 1M0572.



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Predikce intenzit dopravního proudu</b>	<b>6</b>
2.1	Dopravní data . . . . .	6
2.2	Typy testovaných modelů . . . . .	6
2.2.1	Model A . . . . .	8
2.2.2	Model B . . . . .	8
2.3	Odhad parametrů a predikce . . . . .	9
2.4	Porovnání modelů . . . . .	11
2.5	Horizont predikce . . . . .	11
2.6	Výsledný predikční model . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Úloha lineárního programování pro optimalizaci na delším horizontu</b>	<b>16</b>
3.1	Formulace úlohy . . . . .	17
3.1.1	Kritérium . . . . .	17
3.1.2	Okrajové podmínky . . . . .	18
3.2	Realizace optimálního řízení . . . . .	20
3.3	Volitelné parametry algoritmu . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Experimenty</b>	<b>20</b>
4.1	Testovaná oblast . . . . .	20
4.1.1	Popis dopravní mikrooblasti . . . . .	20
4.1.2	Data . . . . .	21
4.1.3	Parametry testů . . . . .	21
4.1.4	Vyhodnocení . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>Literatura</b>	<b>33</b>



# 1 Úvod

Pro potřeby řízení byl navržen lineární model dopravní oblasti, založený na hydrodynamické analogii pro délku kolony, vytvářející se v důsledku SSZ na ramenech dopravních křižovatek. Druhou korekční vazbu v modelu vytváří vazba mezi obsazeností detektoru na daném rameni a délkou kolony, včetně slabé autoregrese. Popsaný model je možné použít díky lineárnosti všech vazeb, omezení i optimalizačního kritéria pro úlohu lineárního programování. Dosud tato úloha byla řešena jako statická.

Další nadstavbou je úloha lineárního programování pro daný časový horizont. Cílem je neoptimalizovat pouze pro aktuální délky kolon, avšak stanovit sled řídicích zásahů (tj. délek relativních dob zelených) tak, aby situace byla optimální na daném časovém horizontu.

Vzhledem k tomuto cíli je však nutné také predikovat alespoň budoucí hodnoty intenzit dopravního proudu. Cílem tedy je určit optimální či postačující tvar regresního modelu, stanovit hodnoty parametrů a zjistit maximální možný horizont predikce.

Kvůli týdenní variabilitě dopravy se nejprve předpokládá specifický regresní model pro každý den v týdnu. Z hlediska stupně modelu jsou tyto individuální modely pro zjednodušení totožné, odlišnost pramení pouze z hodnot parametrů modelů. V konečném kroku se uvažuje o ztotožnění některých modelů (např. úterý je stejné jako čtvrtek, apod.).

## 2 Predikce intenzit dopravního proudu

### 2.1 Dopravní data

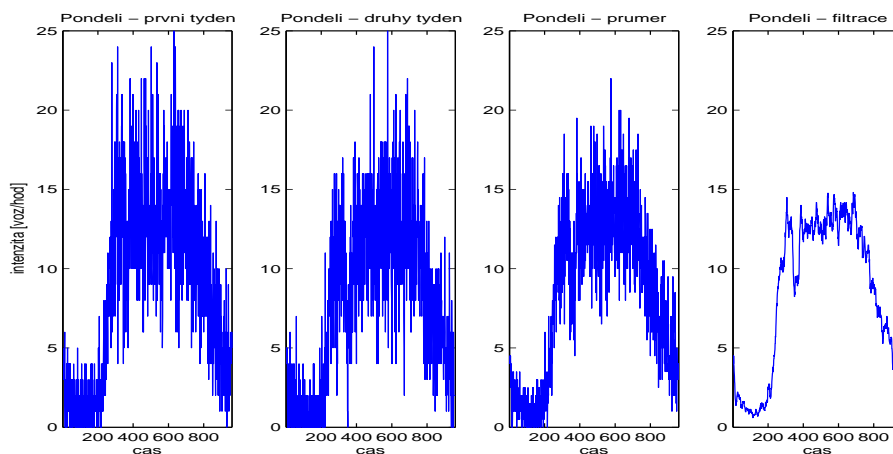
Pro testování autoregrese intenzit byl použit reálný vzorek intenzit dopravního toku, naměřený v oblasti Smíchova, a to 2.6.2005. Perioda měření je 90 sekund a záznam je v celkovém rozsahu 16 po sobě jdoucích dnů. K testování bylo vybráno pouze prvních čtrnáct dní (dva týdny od pondělí do pátku po sobě) a údaje pro každý den byly zprůměrovány. Pro každý den je tedy k dispozici datový vzorek o rozsahu 960 měření.

Získaná data velmi "kmitají", i když v malém rozsahu, a proto byla křivka jejich průběhu vyhlazena (rádius okna 5). Kmity mohou být způsobeny zejména vzorkováním měření, chybou odečtu, apod. Toto zjednodušení by nemělo mít pro zamýšlený účel použití větší negativní dopady.

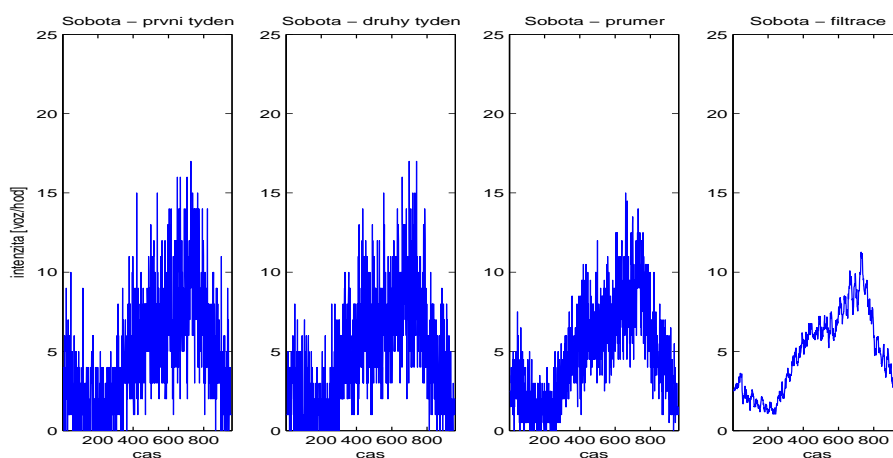
Na obrázcích 1 a 2 jsou znázorněny typické denní průběhy dat v jednotlivých týdnech, průměrné hodnoty v obou týdnech a nakonec také filtrovaná data. Jako vzorový příklad byla zvolena kombinace pondělí a sobota, tedy první pracovní a první víkendový den. Pokles dopravy mimo pracovní týden je zřetelný.

### 2.2 Typy testovaných modelů

Pro testování možnosti predikce intenzit dopravního toku v dostatečné přesnosti byly zvoleny dva základní regresní modely, které se vzájemně odlišují strukturou regresního



Obrázek 1: Použitá dopravní data - všední den



Obrázek 2: Použitá dopravní data - víkend

vektoru. Model si klade za cíl predikovat hodnotu v daném časovém kroku na základě znalosti regresního vektoru a parametrů modelu (resp. jejich bodových odhadů). Obecný tvar modelu lze vyjádřit následovně:

$$y_t = \phi_t' \theta + e_t, \quad (1)$$

kde

- $y_t$  je modelovaná veličina, zde intenzita dopravního toku;
- $\phi_t$  regresní vektor;
- $\theta$  vektor parametrů autoregrese;
- $e_t$  šum modelu za předpokladu  $E(e) = 0$ .

Jelikož se zaměřujeme pouze na lineární regresi, lze uvedený model zobecnit do tohoto tvaru:

$$y_t = \sum_{k=1}^r \theta(k) \phi_t(k) + e_t, \quad (2)$$



kde

$r$  je řád modelu.

Zamýšlený model má vytvářet časové průběhy intenzity dopravního toku na jednom jediném rameni nějaké dopravní křižovatky. Tyto intenzity budou modelovány pouze v místech, kde danému rameni nepředchází nějaká další sledovaná křižovatka, takže nelze nijak odvodit tuto vstupní intenzitu. V opačném případě bude vstupem predikovaný výstup z předchozí křižovatky. Ve smyslu dopravní mikrooblasti, resp. oblasti, se jedná o krajní (mezní, kritické) křižovatky.

### 2.2.1 Model A

Tento model pracuje s regresním vektorem v tomto tvaru:

$$\phi_t = [y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-r}], \quad (3)$$

kde

$y_t$  je modelovaná veličina, zde intenzita dopravního toku;

$r$  je řád modelu.

Model pro predikci intenzity tedy má tvar:

$$y_t = \sum_{k=1}^r p_k y_{t-k}, \quad (4)$$

kde

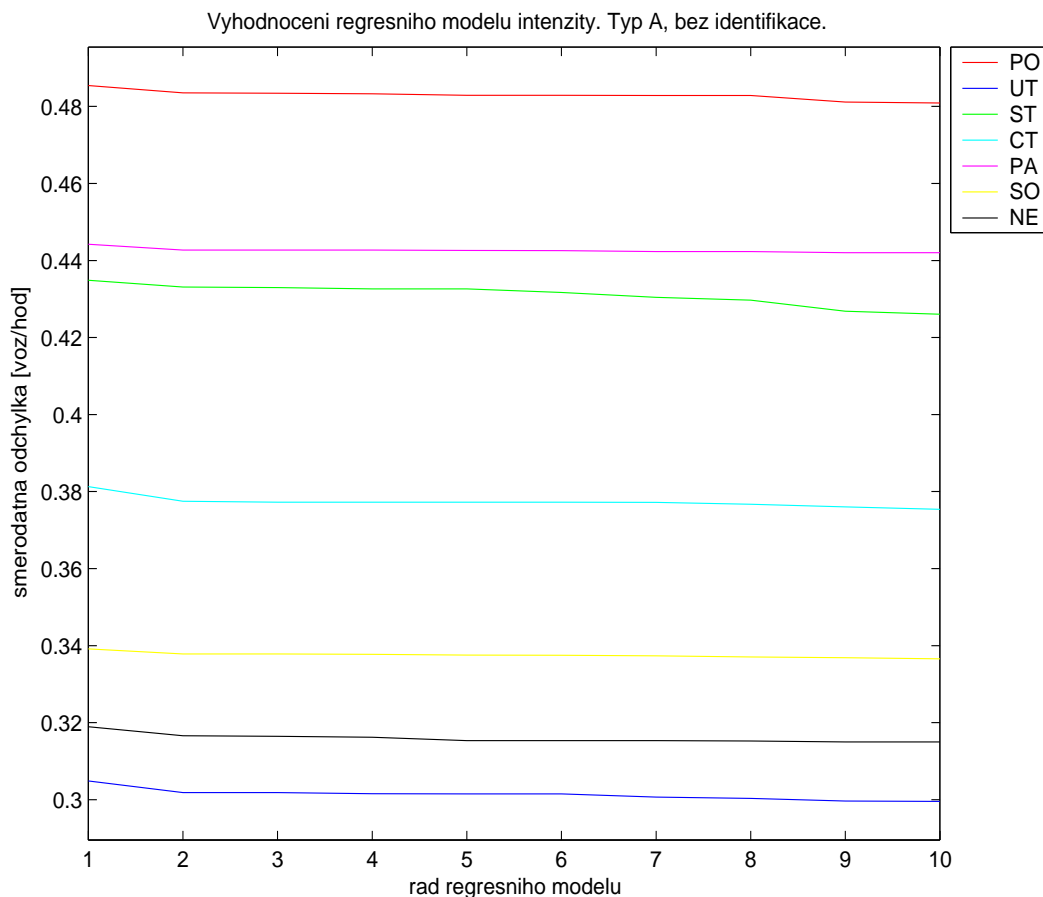
$\theta = [p_1, \dots, p_r]$  jsou parametry modelu.

Na obrázku 3 je vidět vývoj směrodatných odchylek pro jednotlivé dny v týdnu, a to při jednorázovém odhadu parametrů. Je vidět, že pro každý den platí, že při zvyšujícím se řádu modelu dochází ke zpřesňování predikce. Směrodatná odchylka se tedy snižuje, ale rozdíl pro minimální a maximální hodnoty řádu není příliš výrazný - maximální rozdíl je dosažen pro střed a činí 0,0088 jednotkového vozidla za hodinu. Daný výsledek je navíc možné ještě zlepšit, a to zhruba na poloviční hodnoty, zpracováním apriorní znalosti nebo zabudováním krátké počáteční identifikace parametrů modelu (viz dále).

### 2.2.2 Model B

Pro druhý model byl zvolen následující regresní vektor, který dává do vazby nejen aktuální časový průběh intenzit, ale také měření z předchozího dne na témže rameni. Regresní vektor má tvar:

$$\phi_t = [y_{t-1}^j, y_{t-1}^{j-1}, y_{t-2}^j, y_{t-2}^{j-1}, \dots, y_{t-r}^j, y_{t-r}^{j-1}], \quad (5)$$



Obrázek 3: Model A - jednorázová, jednokroková predikce bez počáteční identifikace

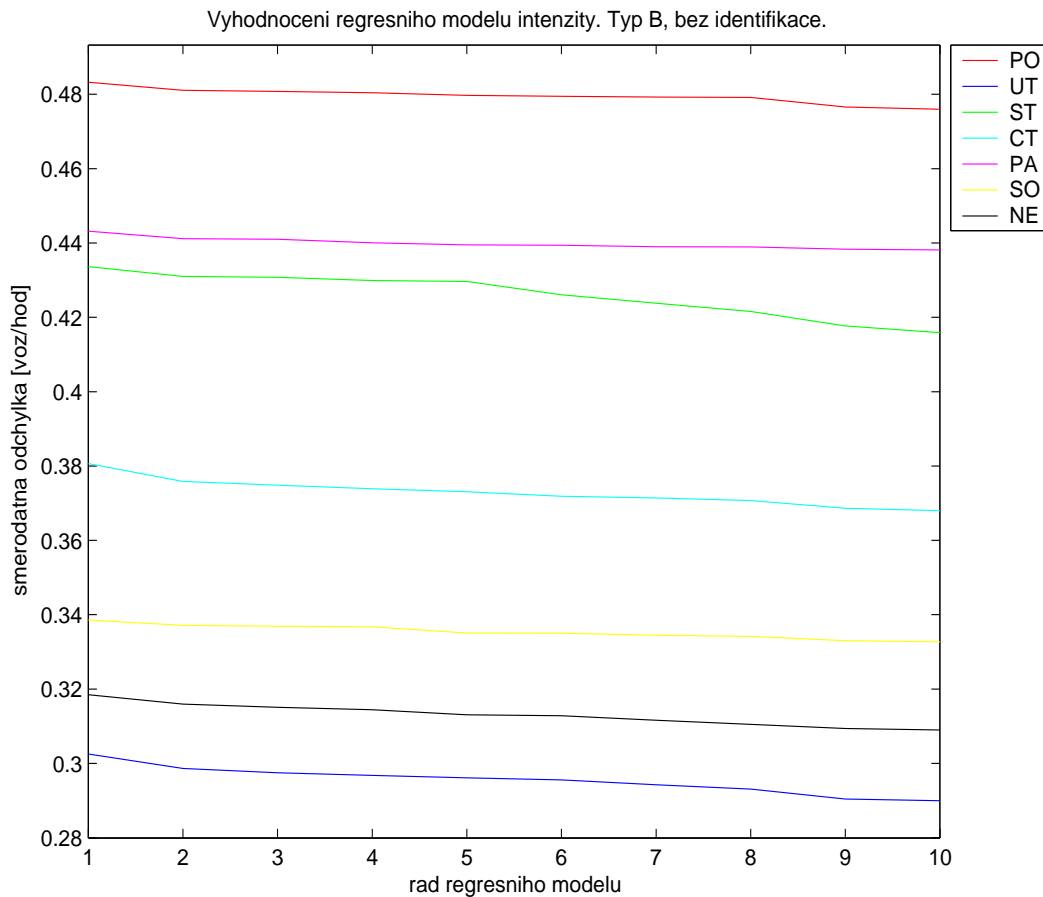
kde

$y_t^j$  je modelovaná veličina, zde intenzita dopravního toku  $j$ -tého dne;  
 $r$  řád modelu.

Na obrázku 4 je vidět opět vývoj směrodatných odchylek pro jednotlivé dny v týdnu, a to při jednorázovém odhadu parametrů, tentokrát pro druhý model. Opět je vidět, že pro každý den platí, že při zvyšujícím se řádu modelu dochází ke zpřesňování predikce, u tohoto typu modelu poněkud výrazněji. Maximální rozdíl je dosažen také pro středu a činí 0,0178 jednotkového vozidla za hodinu. Zpracováním apriorní znalosti nebo zabudováním krátké počáteční identifikace parametrů modelu lze stejně jako v prvním případě směrodatné odchylky snížit.

## 2.3 Odhad parametrů a predikce

Koeficienty regresní přímky obdržíme metodou nejmenších čtverců aplikovanou na vícenásobnou lineární regresní přímku. Algoritmus pracuje podle následujících kroků:



Obrázek 4: Model B - jednorázová, jednokroková predikce bez počáteční identifikace

- aktualizace druhé mocniny rozšířené datové matice:  $V = V + d * d'$ , kde  $d$  je rozšířený regresní vektor,  $d = [y_t, \phi_t']'$ ;
- přerozdělení matice  $V$  tak, že  $V_y = V(1, 1)$  je číslo,  $V_{xy} = V(2 : end, 1)$  je sloupcový vektor a  $V_x = V(2 : end, 2 : end)$  je matice;
- výpočet regresních koeficientů  $\theta = V_x^{-1} V_{xy}$ .

Odhad parametrů se provádí dvojím způsobem, a to

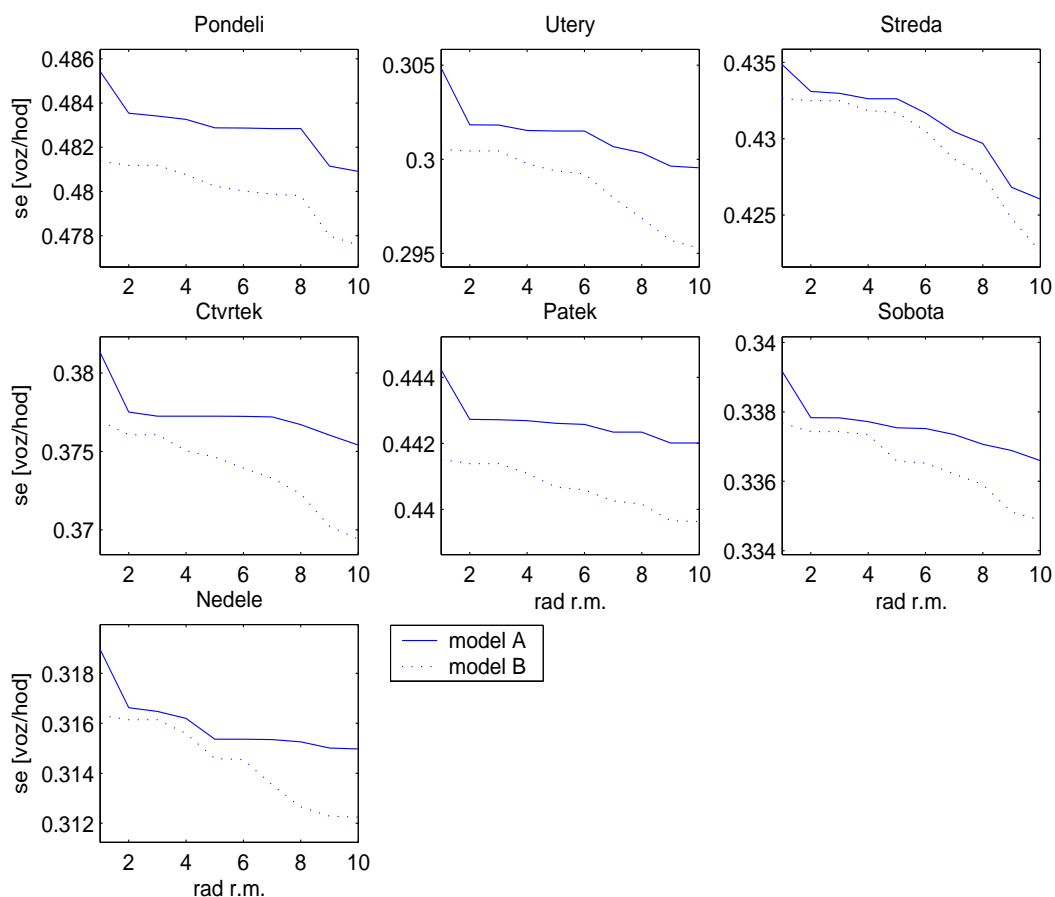
- jednorázově, tj. pouze jednou na celém datovém vzorku, a nebo
- průběžně, tj. odhady jsou aktualizovány v každém kroce po příchodu nového měření.

Pro posouzení kvality lineární autoregrese intenzit bude pro každý specifický případ vyhodnocena směrodatná odchylka reziduí predikovaných a naměřených hodnot.

## 2.4 Porovnání modelů

Podle porovnání hodnot směrodatných odchylek jsou lepší výsledky při jednorázové jednokrokové predikci dosaženy s modelem B. Jak je ovšem vidět na obrázku 5, rozdíly jsou v řádu tisícín (maximální odchylka byla 0,006).

Z tohoto důvodu budeme i nadále pracovat s oběma modely, neboť dávají shodné výsledky při jednokrokové predikci, a rozdílný koncept těchto modelů se může projevit až při delším horizontu predikce.

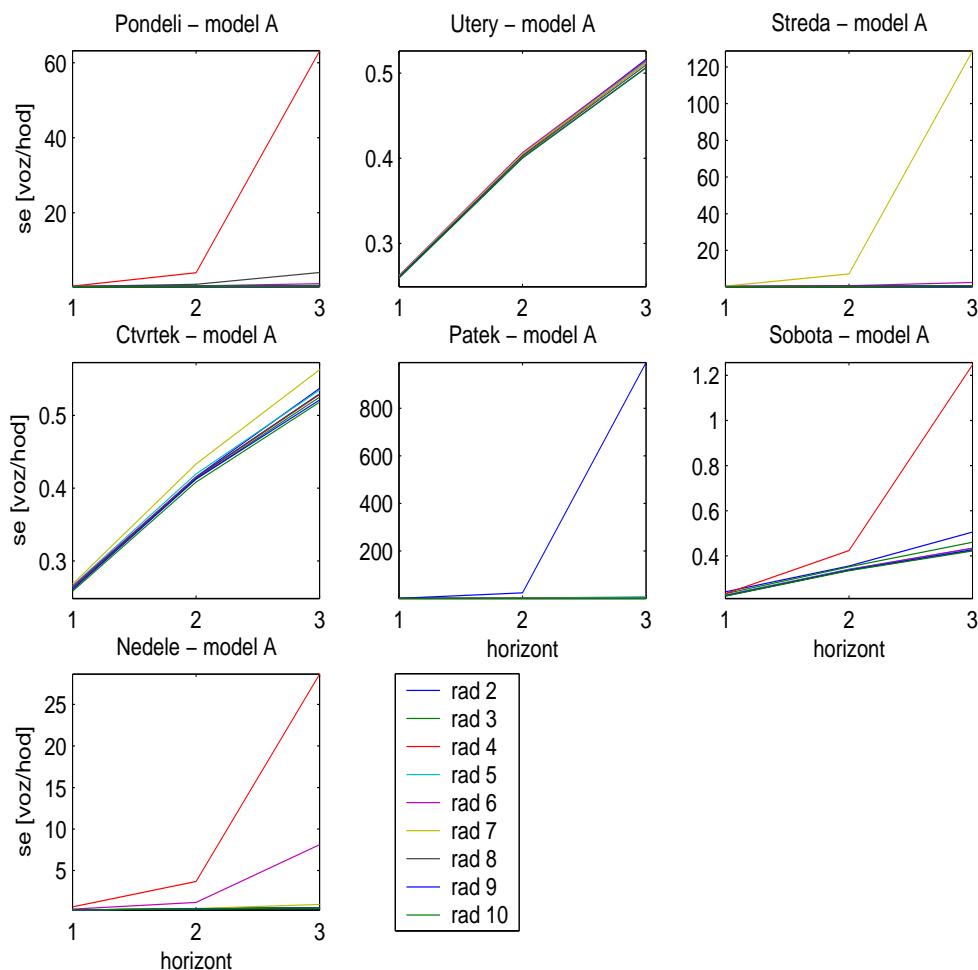


Obrázek 5: Porovnání modelů při jednokrokové predikci bez počáteční identifikace

## 2.5 Horizont predikce

Dané modely byly testovány pro horizont 1 až 10, pro vyšší hodnoty horizontu však byly odchylky neúnosné a predikce intenzit v některých dnech nebyly smysluplné. Stejně tak výrazné zlepšení přineslo zvýšení řádu modelu z 1 na 2, přechody na další vyšší stupně jsou, zvláště pro model A, již pozvolnější (viz obr. 5). Vzhledem k tomu, že rozdíly mezi modely nejsou výrazné (v řádu tisícín), bylo výsledné porovnání modelů prováděno pro řády 2 - 10. Horizont byl volen v rozmezí hodnot 1 až 3, což by v praxi odpovídalo

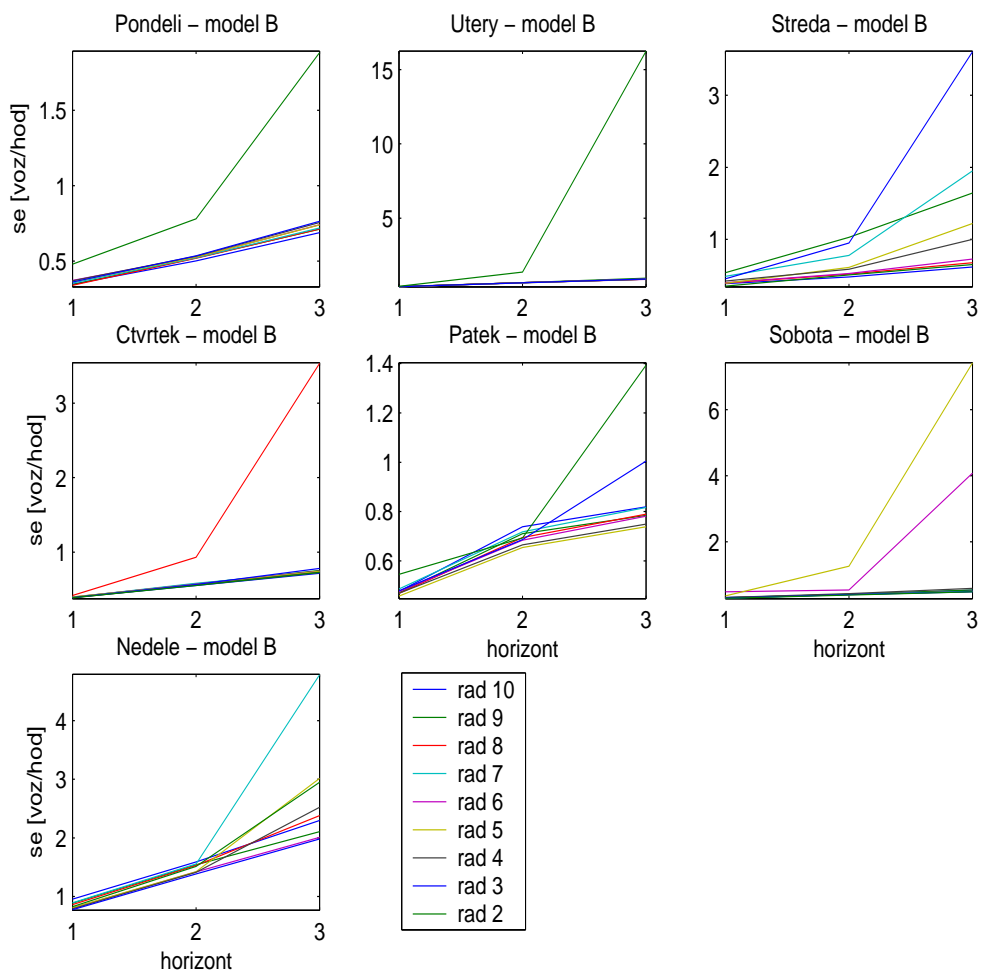
časovému rozsahu 1,5 - 4,5 minuty. Obecná strategie hierarchického regulátoru navrhuje zásahy lokálního řízení po 5 minutách, proto je testovaný rozsah horizontu dostačující.



Obrázek 6: Model A při průběžné vícezkrokové predikci

Středem našeho zájmu jsou horizonty vyšší než 1. Po výše uvedené redukci tedy zbývají dvě možnosti - dvou nebo třízkrová predikce. Vzájemné porovnání modelů při fixovaném horizontu je vidět na následujících obrázcích 8 a 9.

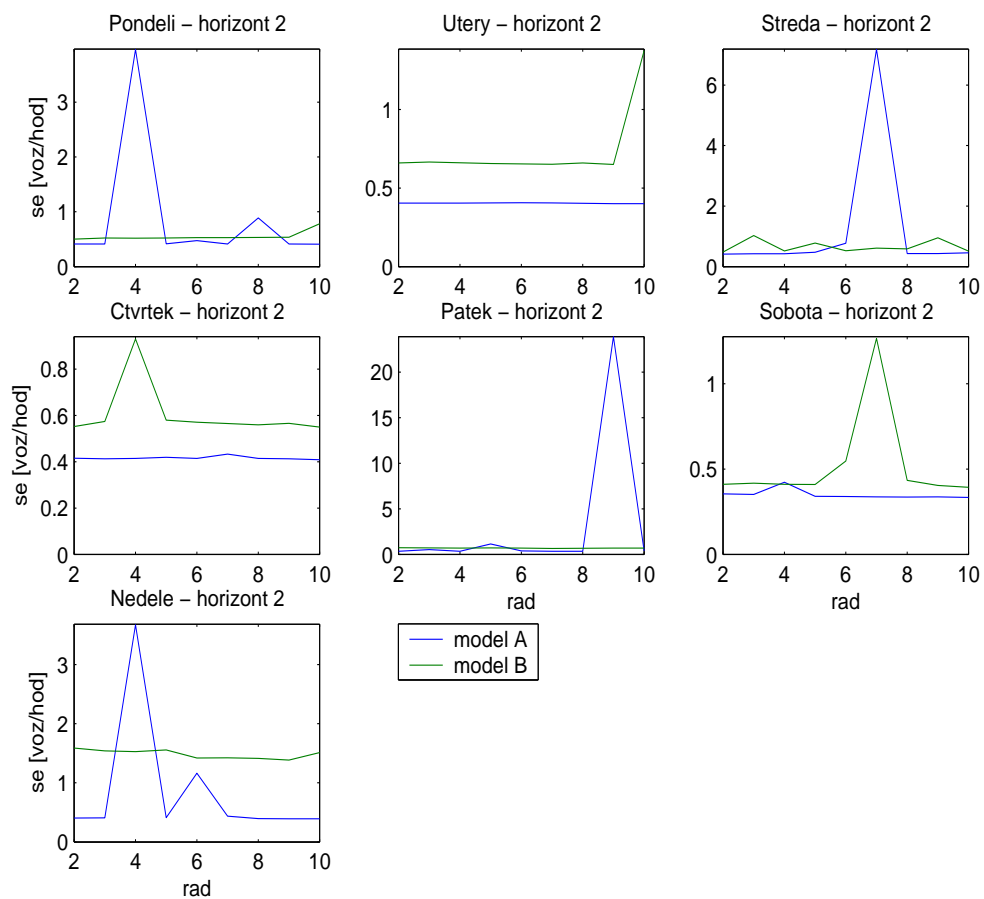
Dosažené výsledky ještě shrňme v tabulce (písmeny A a B jsou označeny jednotlivé modely a h2 nebo h3 označuje horizont predikce 2 nebo 3). Jeden křížek indikuje směrodatnou odchylku v rozmezí 1 - 5, dva křížky odchylku v intervalu 5 - 10, tři křížky jsou pak vyhrazeny pro odchylky mezi 10 a 15 vozidly. Odchylky přesahující hodnotu 15 jsou označeny čtyřmi křížky.



Obrázek 7: Model B při průběžné vícekrokové predikci

Model A - horizont 2									
	řád modelu								
den	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PO			x						
UT									
ST						xx			
CT									
PA				x				xxxx	
SO									
NE			x		x				

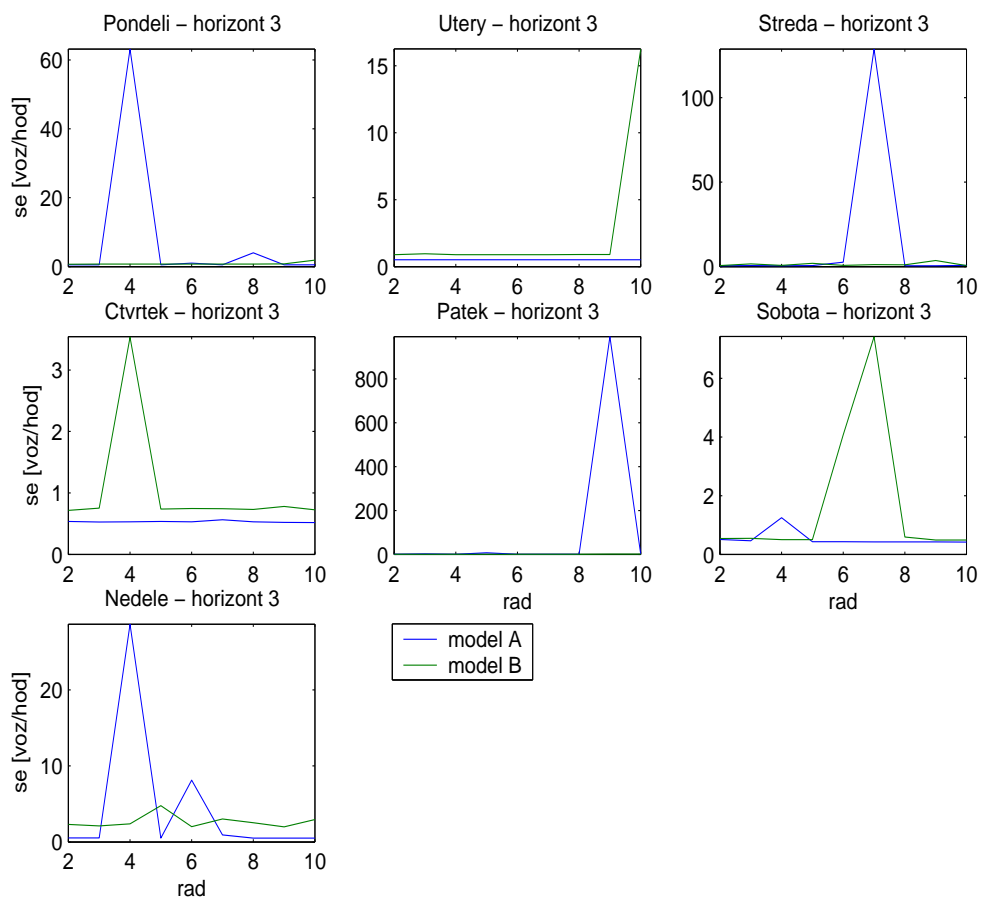
Tabulka č. 1: Zhodnocení výsledků predikce



Obrázek 8: Porovnání modelů - horizont 2

Model A - horizont 3									
	řád modelu								
den	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PO			XXXX		X		X		
UT									
ST						XXXX			
CT									
PA		X		XX				XXXX	
SO			X						
NE			XXXX	XX					

Tabulka č. 2: Zhodnocení výsledků predikce



Obrázek 9: Porovnání modelů - horizont 3

Model B - horizont 2									
	řád modelu								
den	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PO									x
UT									
ST		x							
CT									
PA									
SO						x			
NE	x	x	x	x	x	x	x	x	

Tabulka č. 3: Zhodnocení výsledků predikce



Model B - horizont 3									
	řád modelu								
den	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PO									x
UT									XXXX
ST		x		x	x	x	x	x	
CT			x						
PA								x	x
SO					x	xx			
NE	x	x	x	x	x	x	x	x	

Tabulka č. 4: Zhodnocení výsledků predikce

## 2.6 Výsledný predikční model

Pro zjištění optimálního, resp. postačujícího regresního modelu a maximálního přípustného horizontu pro predikci intenzit dopravního proudu byly vytvořeny a testovány dva modely. Model A bere do úvahy pro intenzitu na určitém rameni pouze závislost na čase v daném dni, tj. na jejím vlastním časovém vývoji během aktuálního dne. Model B tuto závislost rozšiřuje i na předchozí den k danému aktuálnímu. Intenzita na daném rameni nezávisí tedy pouze na svém vlastním dosavadním průběhu, ale i na svém průběhu během předchozího dne.

Jak je z uvedených srovnávacích tabulek vidět, nejlepších výsledků bylo při predikci intenzit dosaženo pro modely řádu 2, 3, 8 a 10 pro horizont 2 a řádu 2 a 10 pro horizont 3. Model B dává sice v průměru nižší hodnoty odchylek, ale pro některé dny (středa a neděle) jsou chyby systematické. Navíc, jak už bylo výše uvedeno, vzájemné odchylky obou modelů jsou minimální.

Pro další použití se proto jako vhodnější jeví koncepčně jednodušší model A řádu 2. Tento model je vyhovující jak pro horizont dva, tak i pro horizont délky tři. Další úplná shoda nastala pro model A při řádu 10. Jelikož však stejných výsledků bylo dosaženo pro řád nižší, tento model se nezdá býti efektivním.

## 3 Úloha lineárního programování pro optimalizaci na delším horizontu

Můžeme-li s dostatečnou přesností predikovat dopravní intenzity na zvoleném horizontu, pak již není příliš komplikované sestavit novou úlohu lineárního programování, která by optimalizovala délky kolon v dopravním mikroregionu na celém požadovaném horizontu.

Jelikož optimální horizont pro predikci intenzit je délky dva, nová úloha LP může prakticky optimalizovat až na horizontu 3. V praxi tento horizont představuje vzhledem

k periodě řízení na lokální úrovni přibližně 15 minut, což je asi opravdu maximální možný čas pro smysluplné predikce. Navíc nadřazená vrstva regulátoru by také měla operovat s periodou 15 minut.

Jak bylo v předcházející kapitole ukázáno, je možné s požadovanou a postačující přesností predikovat intenzity  $i$  pro horizont délky 3. Vzhledem ke skutečnostem, které byly popsány v předchozím odstavci, však tuto variantu nebudeme prozatím testovat. Nicméně, odvozené algoritmy jsou programovány na nejobecnější možné úrovni, takže lze pomocí nich testovat řízení na libovolně dlouhém horizontu.

### 3.1 Formulace úlohy

Pro úlohu optimalizace délek kolon na horizontu delším než jedna je opět uvažováno lineární programování ve své běžné podobě. Tato uvažovaná optimalizační metoda řeší v konečném počtu kroků následující úlohu:

$$J = q' \chi \rightarrow \min \quad (6)$$

$$P_1 \chi > r_1 \quad (7)$$

$$P_2 \chi = r_2 \quad (8)$$

$$h_1 < \chi < h_2 \quad (9)$$

kde

- (6) je minimalizované lineární kritérium, tvořené skalárním součinem vektoru vah  $q$  a vektorem optimalizovaných veličin  $\chi$ ;
- (7) soustava omezení pro optimalizované veličiny  $\chi$  ve tvaru nerovností;
- (8) soustava omezení pro optimalizované veličiny  $\chi$  ve tvaru rovností;
- (9) omezení ve tvaru intervalů  $(h_1, h_2)$  přímo pro složky optimalizovaných veličin (nejčastěji používané jako podmínky nezápornosti).

#### 3.1.1 Kritérium

Kritérium pro uvažovanou úvahu je zvoleno v podobě váženého součtu délek kolon v celé mikrooblasti a na celém horizontu optimalizace:

$$J = \sum_{t=1}^{t+h} \omega_t \sum_{i=1}^n w_i \xi_{i,t} \quad (10)$$

kde

- $J$  je hodnota kritéria pro mikrooblast;
- $h$  horizont optimalizace ( $h \geq 1$ );
- $\omega_t$  váha kolon pro horizont  $t$ ;
- $n$  počet všech kolon v mikrooblasti;
- $w_{i,t}$  váha pro  $i$ -tou kolonu;
- $\xi_{i,t}$  délka  $i$ -té kolony v mikrooblasti.

Jak se ukazuje, právě kriteriální váhy jsou nejdůležitější a nejvýznamnější součástí kritéria. Pomocí nich se dají významně ovlivnit výsledné optimalizované délky kolon. Jak se ukazuje (viz 4, pouhou optimalizací prostého součtu kolon nelze dosáhnout rovnoměrných délek kolon na všech ramenech křížovatek mikrooblasti. Váhy lze proto buď volit experimentálně ze znalosti dopravních poměrů v mikrooblasti. To si však vyžaduje velmi dobrou znalost časového vývoje dopravních veličin v oblasti. Pevně zvolené váhy navíc mohou v některých specifických případech dokonce situaci zhoršit.

Aby bylo dosaženo pokud možno rovnoměrného rozložení délek kolon v celé oblasti, je nutné nejen minimalizovat prostý součet délek kolon, ale také jejich vzájemné rozdíly. Z tohoto důvodu je výhodnější váhy průběžně měnit, a to s ohledem na aktuální situaci v mikrooblasti. Váhy jsou proto odvozovány na základě bodových odhadů délek kolon v mikrooblasti v čase  $t + 1$  tak, aby bylo dosaženo rovnoměrnosti:

$$w_i = \frac{25 * \xi_{i;t+1}}{\sum_{i=1}^n \xi_{i;t}} \quad (11)$$

Následně pak pro celý zbývající horizont, tj. pro čas  $t + 1$  až  $t + h$  jsou pak pro délky kolon uvažovány tytéž váhy  $w_i$  vzhledem k rovnoměrnosti délek. Zmíněné váhy jsou dále násobeny vahami pro optimalizaci na horizontě  $\omega_t$ , které rozlišují preferenci optimalizace na celém horizontu. V naší úloze a následných experimentech byly použity tři typy těchto vah:

1. rovnoměrné na horizontu, tj. stejné v každém okamžiku;
2. preference minimalizace časově nejbližších kolon, tj. váhy se s časem snižují;
3. preference minimalizace časově nejvzdálenějších kolon, tj. váhy se s časem zvyšují;

### 3.1.2 Okrajové podmínky

K základním omezením patří logická omezení všech veličin, převážně ve tvaru nerovností:

1. délky kolon jsou nezáporné a shora omezené maximální možnou délkou na daném rameni, určenou stavební úpravou a případnými požadavky operátora;
2. relativní zelené jsou také nezáporné, zdola omezené minimální povolenou hodnotou;
3. součet relativních zelených je pro každou křížovátku konstantní;
4. a případné další.

Omezení ve tvaru rovnosti plyne ze stavové rovnice pro délky kolon. Základní rovnici pro výpočet délky kolony, plynoucí z hydrodynamické analogie,

$$\xi_{i;t+1} = \delta_{i;t}\xi_{i;t} - [(1 - \delta_{i;t})I_{i;t} + \delta_{i;t}S_i]z_{i;t} + I_{i;t} \quad (12)$$

je nutné upravit. Postup uvedeme na příkladu pro jedno rameno. Nejprve sestavíme základní rovnice pro délky kolon na celém horizontu:

$$\begin{aligned}
\xi_{i;t+1} &= \delta_{i;t}\xi_{i;t} - [(1 - \delta_{i;t})I_{i;t} + \delta_{i;t}S_i]z_{i;t} + I_{i;t} \\
\xi_{i;t+2} &= \delta_{i;t+1}\xi_{i;t+1} - [(1 - \delta_{i;t+1})I_{i;t+1} + \delta_{i;t+1}S_i]z_{i;t+1} + I_{i;t+1} \\
&\vdots \\
\xi_{i;t+h} &= \delta_{i;t+h-1}\xi_{i;t+h-1} - [(1 - \delta_{i;t+h-1})I_{i;t+h-1} + \delta_{i;t+h-1}S_i]z_{i;t+h-1} + I_{i;t+h-1} \quad (13)
\end{aligned}$$

Výše uvedené rovnice (13) pak můžeme pro daný horizont  $h$  shrnout do jediné maticové rovnice pro nový stavový vektor  $\Xi(t) = [\xi_{i;t}, \xi_{i;t+1}, \dots, \xi_{i;t+h-1}]$ :

$$\Xi_{i;t+1} = Rd_{i;t}^{-1}([\delta_{i;t}, 0, \dots, 0]\Xi_{i;t} - B_{i;t}z_{i;t} + Fp_{i;t}) \quad (14)$$

kde

$$\begin{aligned}
Rd_{i;t} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\delta_{i;t+1} & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\delta_{i;t+h-1} & 1 \end{bmatrix}, \\
B_{i;t} &= \begin{bmatrix} b(1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & b(2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & b(h-1) \end{bmatrix}, \quad (15)
\end{aligned}$$

$$b(j) = (1 - \delta_{i;j})I_{i;t} - \delta_{i;j}S_i \quad \text{pro } j = t, t+1, \dots, t+h-1,$$

$$z_t = [z_{i;t}; z_{i;t+1}; \dots; z_{i;t+h-1}]' \text{ je vektor relativních zelených,}$$

$$Fp_{i;t} = [I_{i;t}; I_{i;t+1}; \dots; I_{i;t+h-1}]'.$$

Stavovým vektorem pro úlohu LP je  $\chi_t = [\Xi'_{i;t+1}, z'_{i;t}]'$ , a proto stavovou rovnici modelu upravíme tak, aby veličiny z vektoru  $\chi$  byly vlevo, tj.

$$\Xi_{i;t+1} + Rd_{i;t}^{-1}B_{i;t}z_{i;t} = Rd_{i;t}^{-1}[\delta_{i;t}, 0, \dots, 0]\hat{\Xi}_{i;t} + Rd_{i;t}^{-1}Fp_{i;t}, \quad (16)$$

kde

$\hat{\Xi}_{i;t}$  představuje odhad stavu z minulého kroku; vzhledem k dané specifikaci se prakticky jedná pouze o odhady minulých kolon  $\xi_{i;t}$ .

Uvažujeme-li vektor pro úlohu LP v uvedeném tvaru, lze tuto rovnici přepsat jako

$$\Pi_{i;t}\chi_{i;t} = A_{i;t}\hat{\Xi}_{i;t} + F_{i;t}, \quad (17)$$

což není nic jiného než soustava omezení pro  $\chi$  ve tvaru rovností.

Jak je z výše uvedeného patrné, pro danou úlohu je nutné nejen predikovat intenzity  $I$  až do času  $t + h - 1$ , ale na jejich základě odhadnout i odpovídající hodnoty  $\delta$ . Jejich hodnoty budeme považovat pro danou úlohu za fixní. Lze předpokládat, že v tak relativně malém časovém úseku se jejich hodnoty nebudou měnit, tj. že průjezdy z jednotlivých ramen se nebudou výrazně odlišovat, protože změna zelených je dostatečně malá.

## 3.2 Realizace optimálního řízení

Výsledné optimální hodnoty relativních zelených nebudou použity přímo, ale budou použity pouze na určení optimálního směru jejich změny, která bude realizována snížením či prodloužením aktuálních dob relativních zelených o pevně daný inkrement (minimální délky 1s).

## 3.3 Volitelné parametry algoritmu

Z výše uvedeného vyplývají následující volby algoritmu:

1. LP řízení - zapnuto či vypnuto;
2. horizont - libovolná volba horizontu většího než 1;
3. kritérium - volba mezi prostým součtem délek kolon nebo optimálně váženým součtem;
4. váhy na horizontu - ovlivnění míry preference při optimalizaci na horizontu.

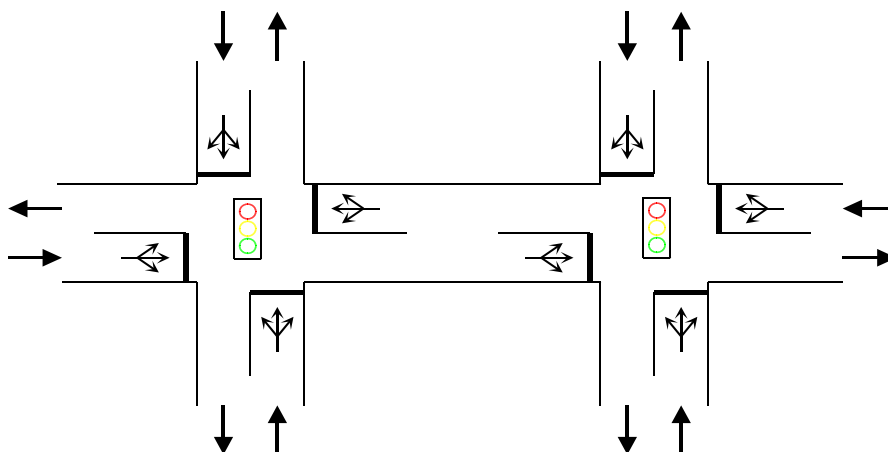
# 4 Experimenty

## 4.1 Testovaná oblast

### 4.1.1 Popis dopravní mikrooblasti

Testovaná oblast se skládá ze dvou čtyřramenných křižovatek se světelnou signalizací, každé rameno má jeden vstupní a jeden výstupní jízdní pruh. Výjezd z ramen je povolen všemi směry. Schema této dopravní mikrooblasti je znázorněno na obrázku 10.

Parametry oblasti jako jsou koeficienty odbočení a saturované toky jsou známé a konstantní během celého dne. Detektory jsou umístěny na šesti z celkového počtu osmi ramen, tedy na všech vstupech a výstupech z mikrooblasti. Měření chybí pouze na vnitřních propojovacích ramenech mezi těmito křižovatkami. Pro signální plány obou křižovatek byly použity pouze dvě fáze (první pro vodorovný a druhá pro svislý směr). Doba cyklu je pevná a stejná pro obě křižovatky, její délka je také známá a konstantní po celou dobu experimentu.



Obrázek 10: Schema mikrooblasti

#### 4.1.2 Data

Na vstupech byla použita reálná měření intenzit, zbývající veličiny jako výstupní intenzity a délky kolon byly digitálně simulovány z důvodu nedostatečného měření v oblasti.

#### 4.1.3 Parametry testů

Testy byly prováděny pro LP na horizontu 1 – 3 při aplikaci různých kombinací vah pro rovnoměrnost a vah na horizontu. Potřebné predikce intenzit byly počítány při současném odhadování parametrů regresního modelu druhého řádu. Inkrement pro změnu zelených měl hodnotu 1s.

#### 4.1.4 Vyhodnocení

Výsledné hodnocení bylo prováděno jednak graficky, jednak výpočtem průměrných kolon na jednotlivých ramenech i v celé mikrooblasti. V níže uvedených tabulkách jsou uvedeny průměrné délky kolon na jednotlivých ramenech křižovatek (1-4 pro první, 5-8 pro druhou křižovátku, značení se provádí zleva proti směru hodinových ručiček), a to při vybraných parametrech testu (volba kritéria). Dále je pak v tabulce uvedena průměrná délka kolony v celé mikrooblasti a rozptyl průměrných délek na ramenech.

Při grafickém znázornění byly umístěny grafy s časovým průběhem dané dopravní veličiny na pozici ramene dané křižovatky. Na  $x$ -ové souřadnici je vynášen čas (zde časové vzorky jednoho dne), na druhé ose pak lze vyčíst hodnoty dopravních veličin (jednotková vozidla pro délky kolon, bez jednotek pro relativní zelené).

Na grafech, které zobrazují časový vývoj délek kolon, jsou modrou plnou čarou zakresleny simulované hodnoty a jejich odhady pak červenými křížky. Jelikož se zde jedná pouze o dvofázové signální plány, je graficky znázorněn průběh relativních zelených pouze ve vodorovném směru v každé křižovatce, ve svislém je pak jen jejich doplňkem

do maximální relativní doby zeleného signálu.

Při testování bylo dosaženo následujících výsledků (váhy na ramenech jsou označeny písmenem w - R pro rovnoměrné, O pro optimální, váhy na horizontu pak písmenem  $\omega$ ):

### Horizont 1

parametry kriteria	průměrné délky na ramenech								celkový $\emptyset$	rozptyl
	r. 1	r. 2	r. 3	r. 4	r. 5	r. 6	r. 7	r. 8		
bez řízení	24	10	23	11	23	12	22	9	16	6.341
w R	11	33	19	31	22	33	14	18	23	8.124
w O	15	23	19	21	14	18	16	10	17	3.876

Obrázky: 11, 12, 13, 14.

### Horizont 2

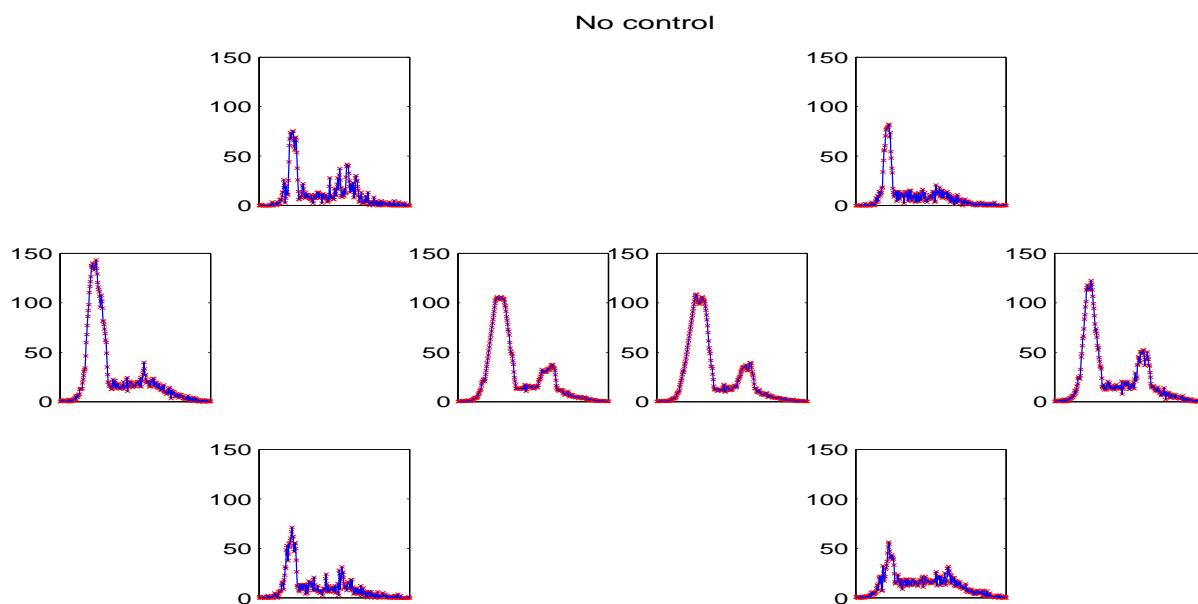
parametry kriteria	průměrné délky na ramenech								celkový $\emptyset$	rozptyl
	r. 1	r. 2	r. 3	r. 4	r. 5	r. 6	r. 7	r. 8		
w R; $\omega=[1\ 1]$	11	22	11	21	23	18	21	10	17	5.069
w R; $\omega=[10\ 1]$	11	23	10	23	23	19	20	11	18	5.440
w R; $\omega=[1\ 10]$	12	21	11	20	21	16	20	10	16	4.576
w O; $\omega=[1\ 1]$	16	14	14	17	14	19	16	10	15	2.353
w O; $\omega=[10\ 1]$	16	15	13	16	14	18	16	10	15	2.375
w O; $\omega=[1\ 10]$	15	14	15	16	14	17	15	10	15	1.859

Obrázky: 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21.

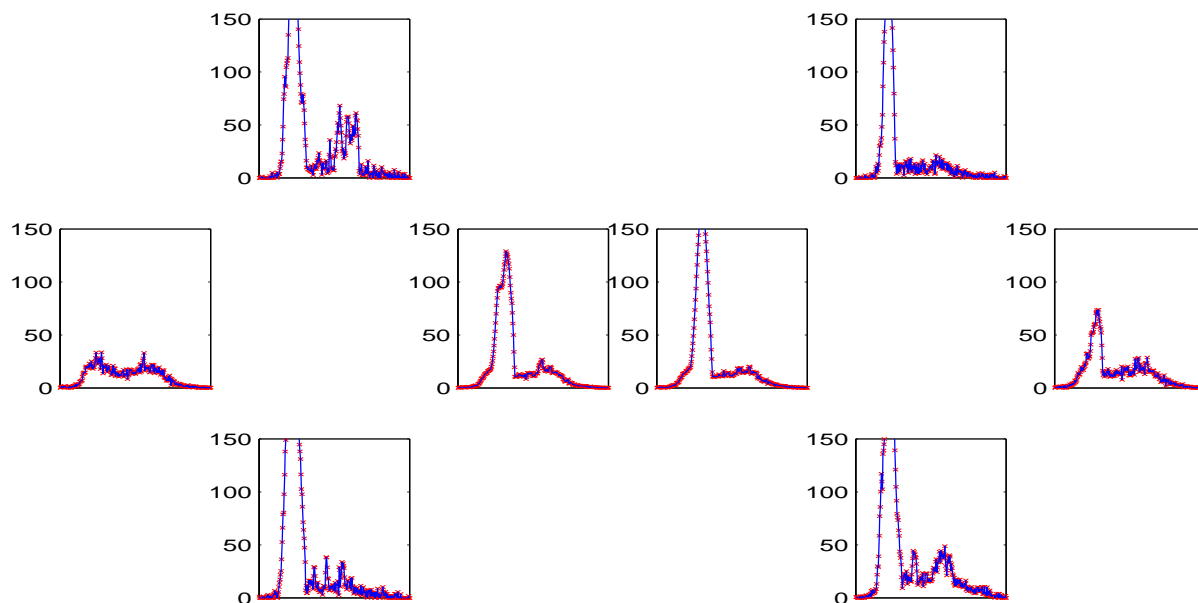
### Horizont 3

parametry kriteria	průměrné délky na ramenech								celkový $\emptyset$	rozptyl
	r. 1	r. 2	r. 3	r. 4	r. 5	r. 6	r. 7	r. 8		
w R; $\omega=[1\ 1\ 1]$	11	24	12	23	20	17	19	10	17	5.211
w R; $\omega=[10\ 5\ 1]$	11	25	11	23	22	18	21	10	18	5.700
w R; $\omega=[1\ 5\ 10]$	11	24	13	22	19	16	18	10	17	4.841
w O; $\omega=[1\ 1\ 1]$	17	16	17	17	14	17	16	10	15	2.212
w O; $\omega=[10\ 5\ 1]$	17	16	17	18	14	17	16	10	16	2.306
w O; $\omega=[1\ 5\ 10]$	16	15	15	16	15	16	17	10	15	2.014

Obrázky: 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28.

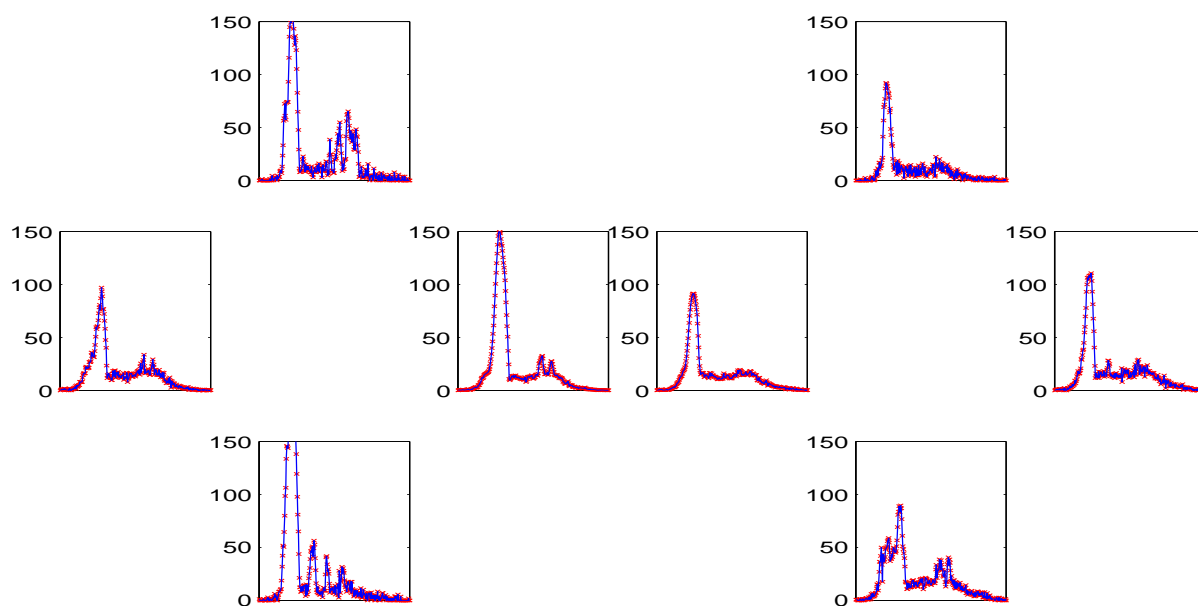


Obrázek 11: Bez řízení

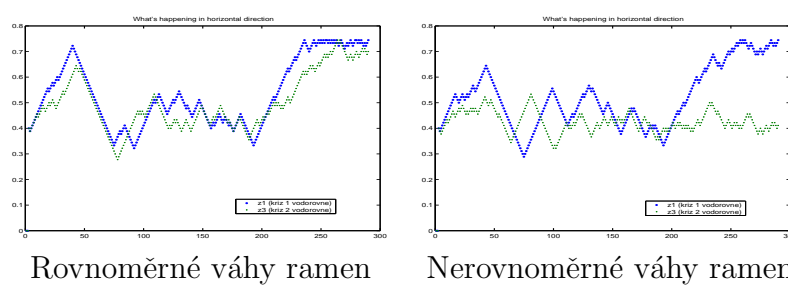


Obrázek 12: Horizont 1 - rovnoměrné váhy ramen

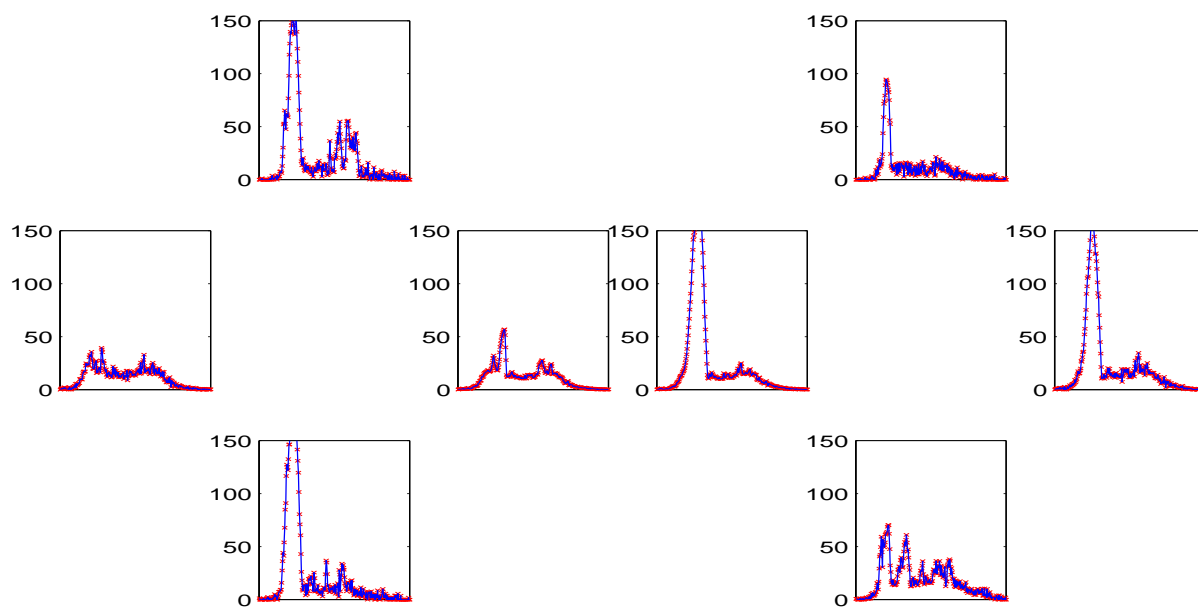




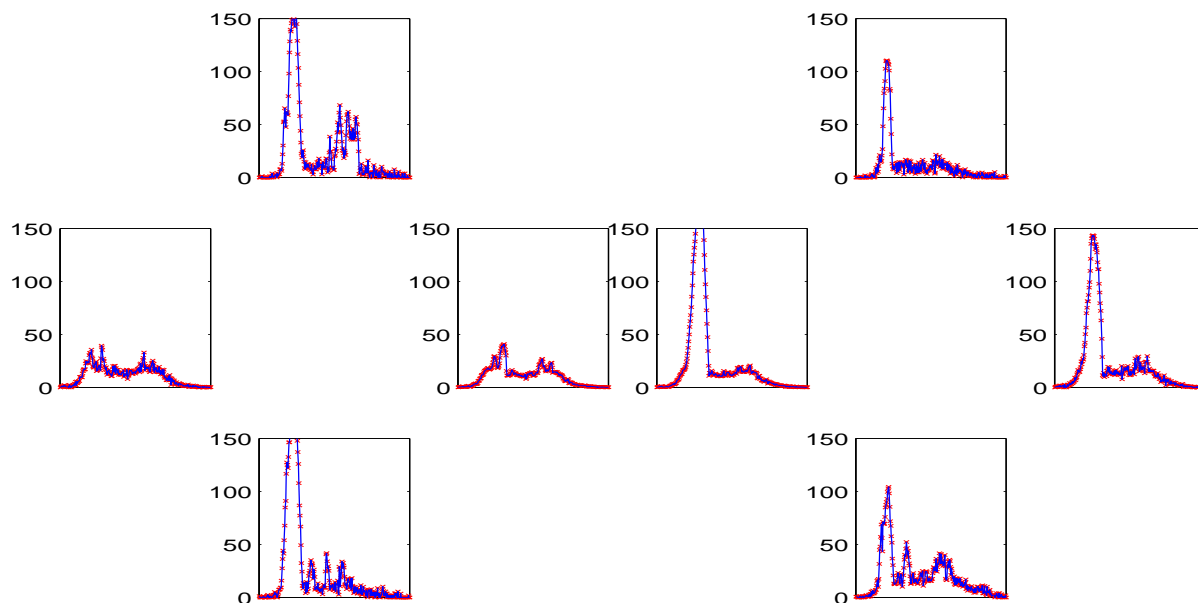
Obrázek 13: Horizont 1 - nerovnoměrné váhy ramen



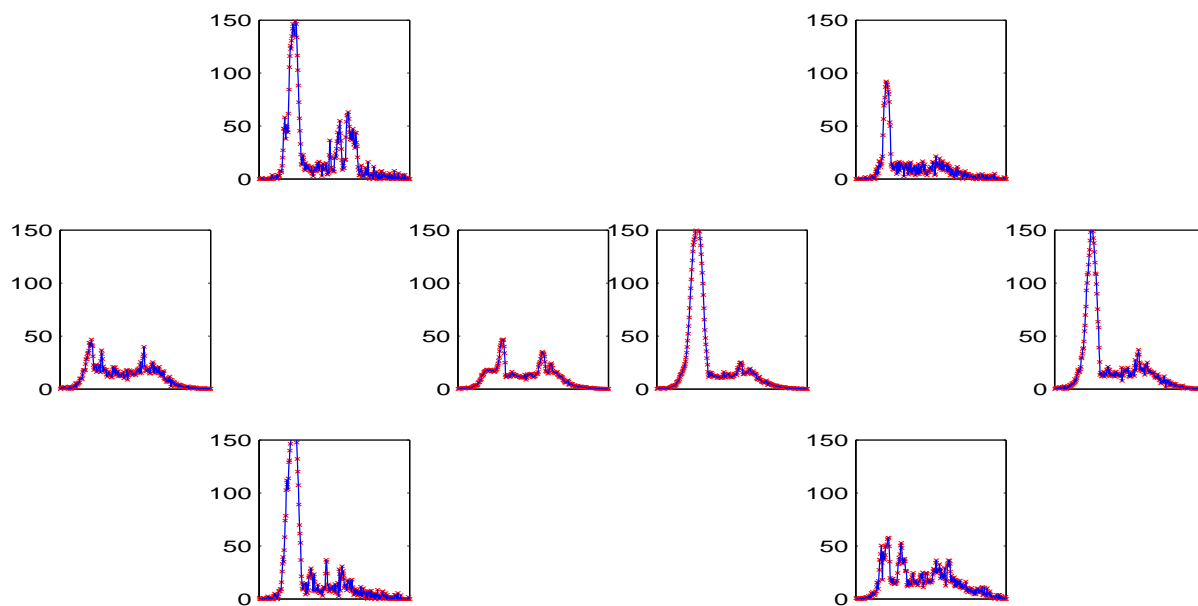
Obrázek 14: Horizont 1 - relativní zelené ve vodorovném směru



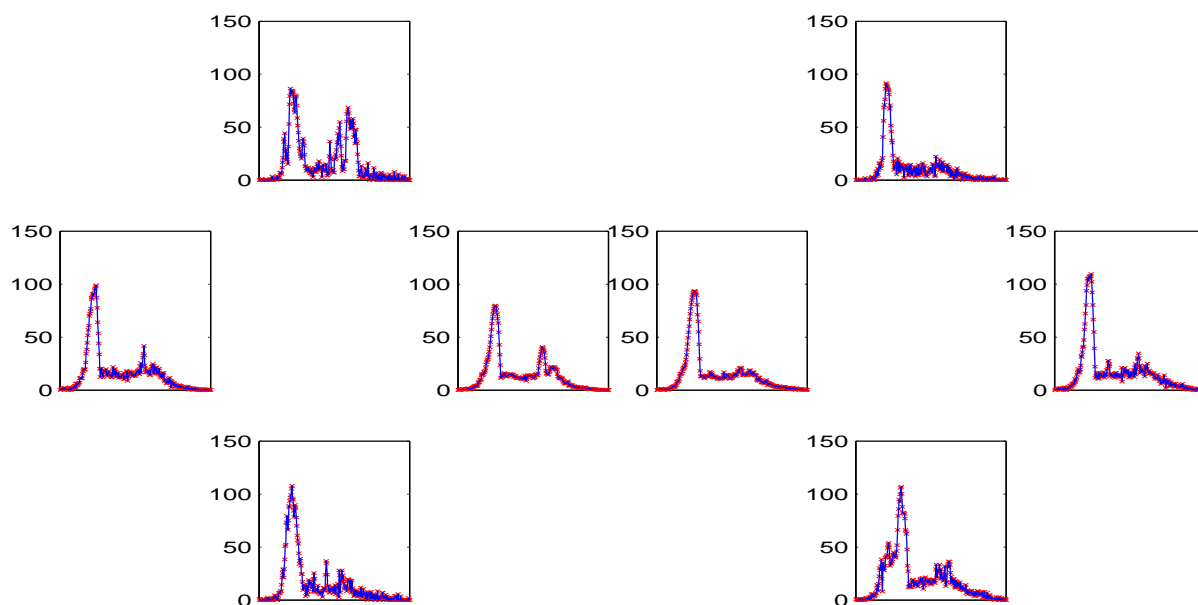
Obrázek 15: Horizont 2 - rovnoměrné váhy ramen



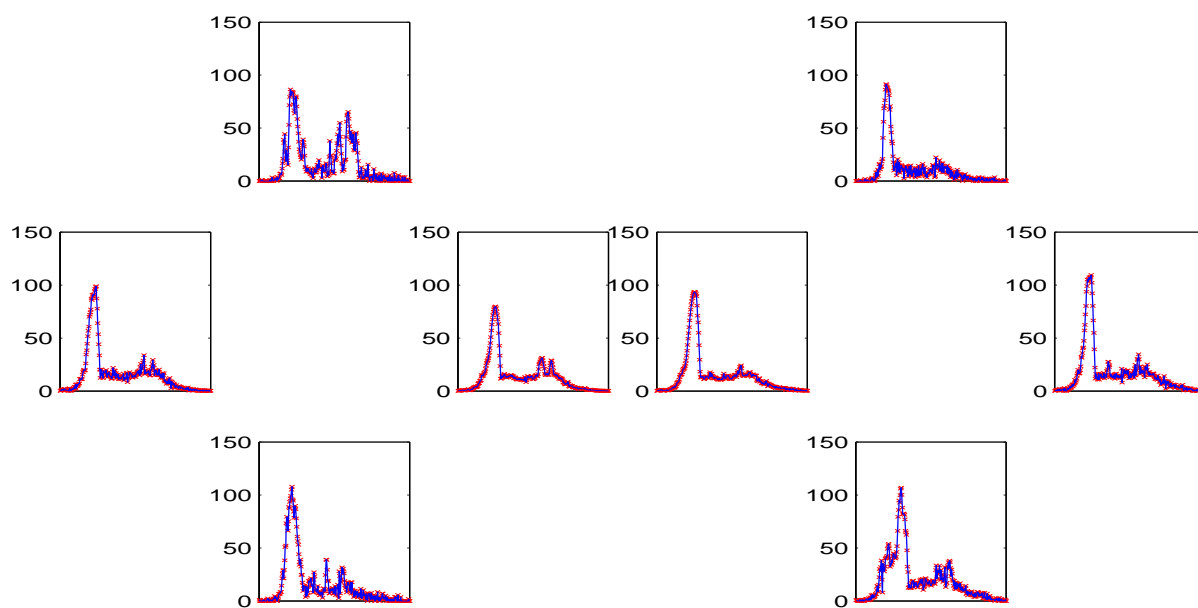
Obrázek 16: Horizont 2 - rovnoměrné váhy ramen, na horizontu preference nejbližších



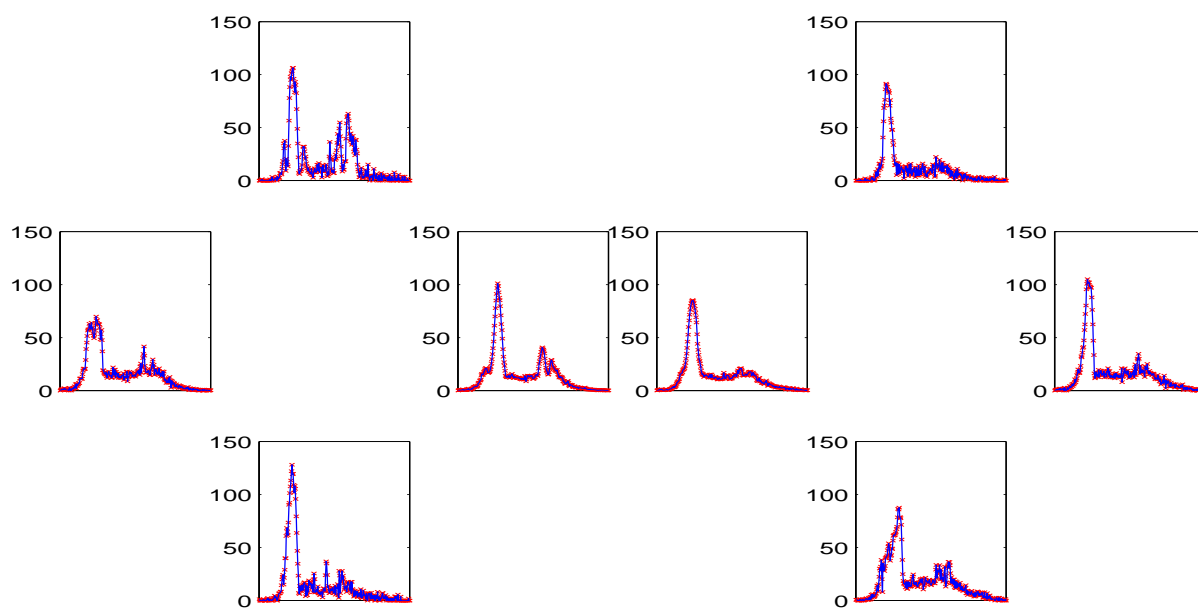
Obrázek 17: Horizont 2 - rovnoměrné váhy ramen, na horizontu preference nejvzdálenějších



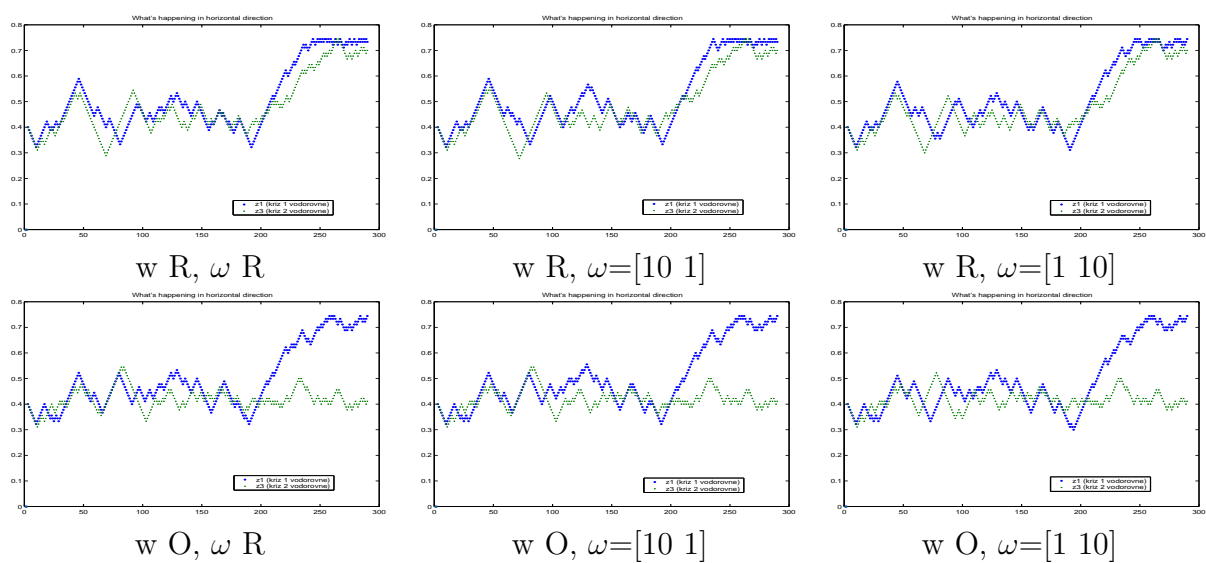
Obrázek 18: Horizont 2 - nerovnoměrné váhy ramen



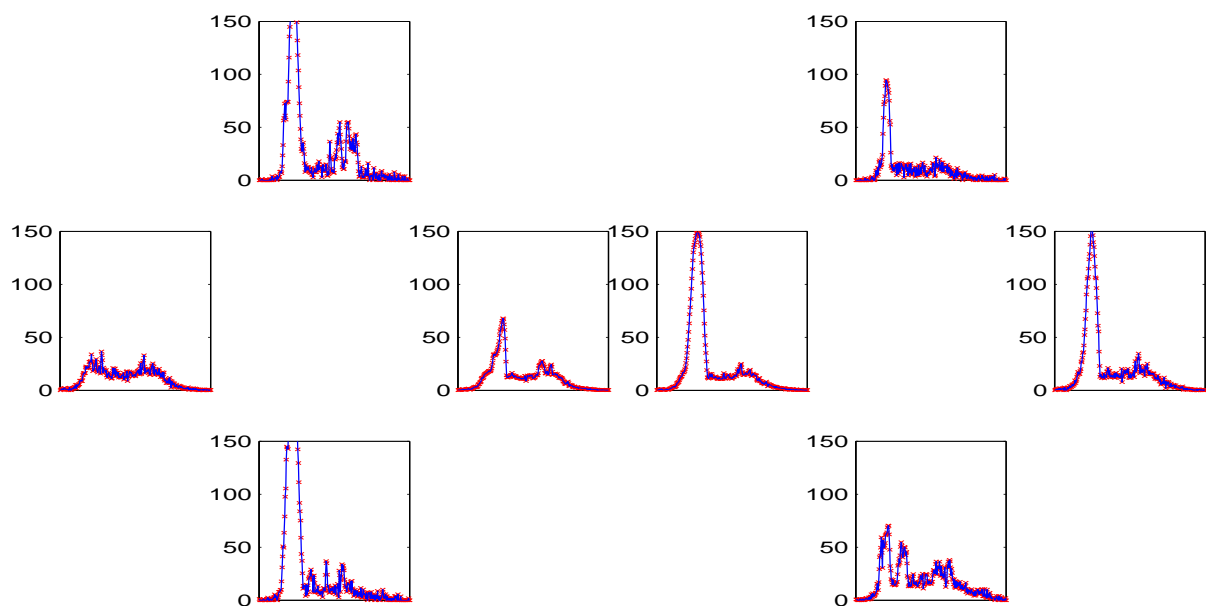
Obrázek 19: Horizont 2 - nerovnoměrné váhy ramen, na horizontu preference nejbližších



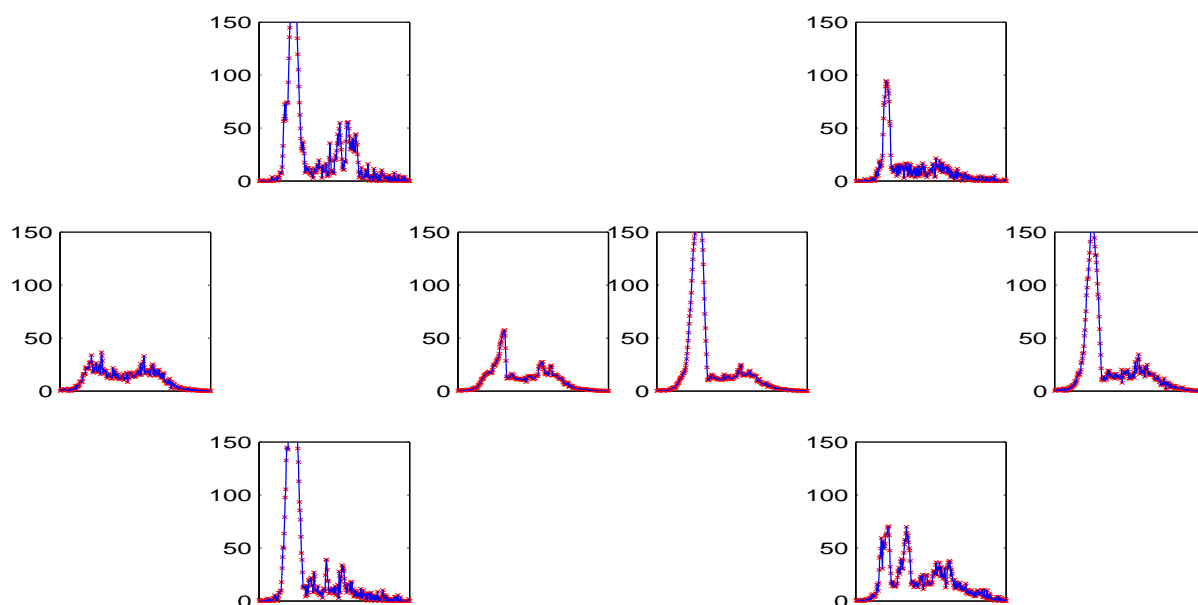
Obrázek 20: Horizont 2 - nerovnoměrné váhy ramen, na horizontu preference nejvzdálenějších



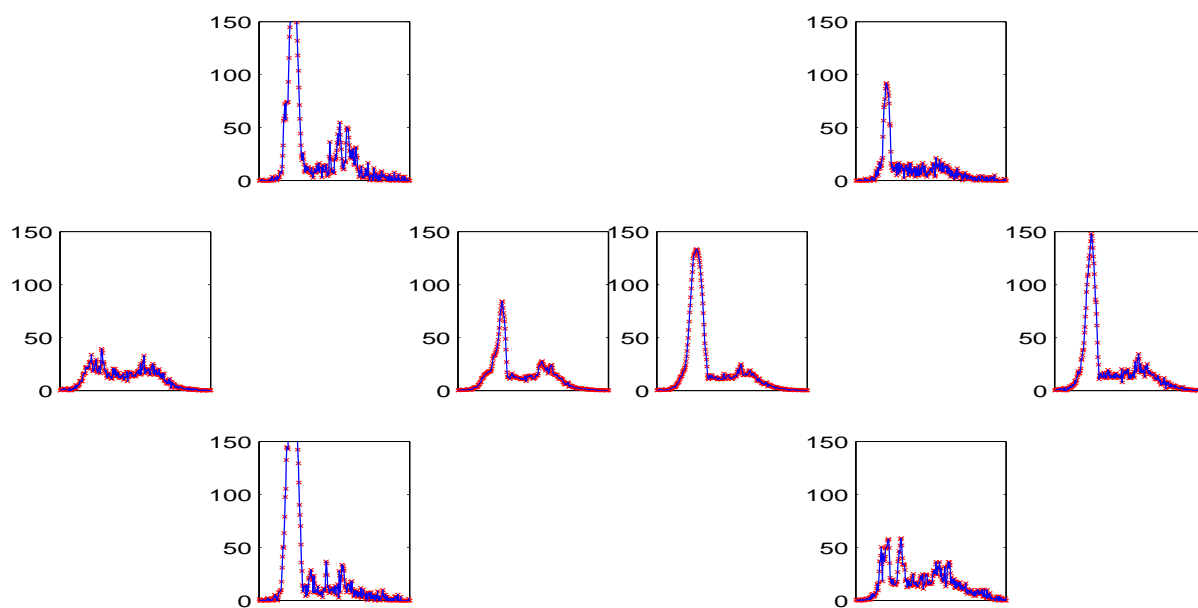
Obrázek 21: Horizont 2 - relativní zelené ve vodorovném směru



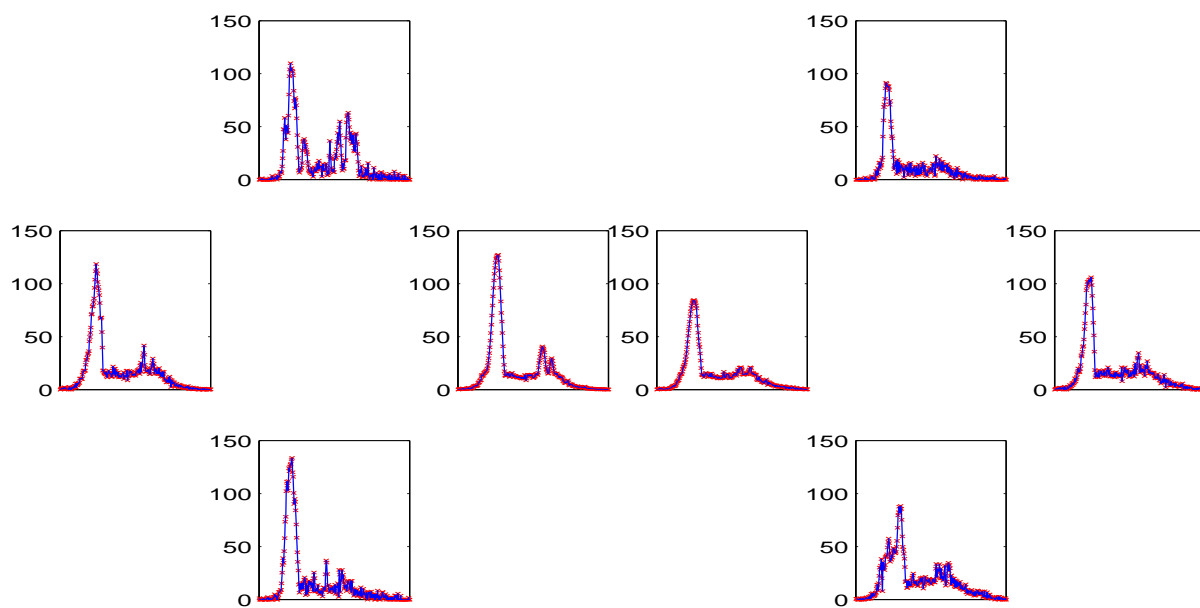
Obrázek 22: Horizont 3 - rovnoměrné váhy ramen



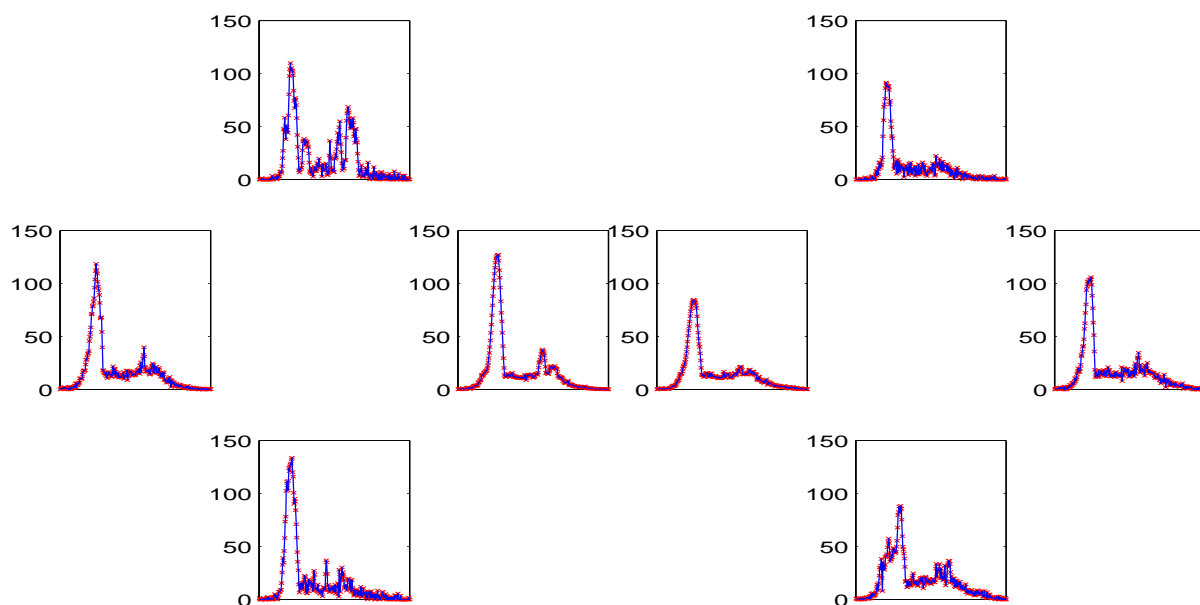
Obrázek 23: Horizont 3 - rovnoměrné váhy ramen, na horizontu preference nejbližších



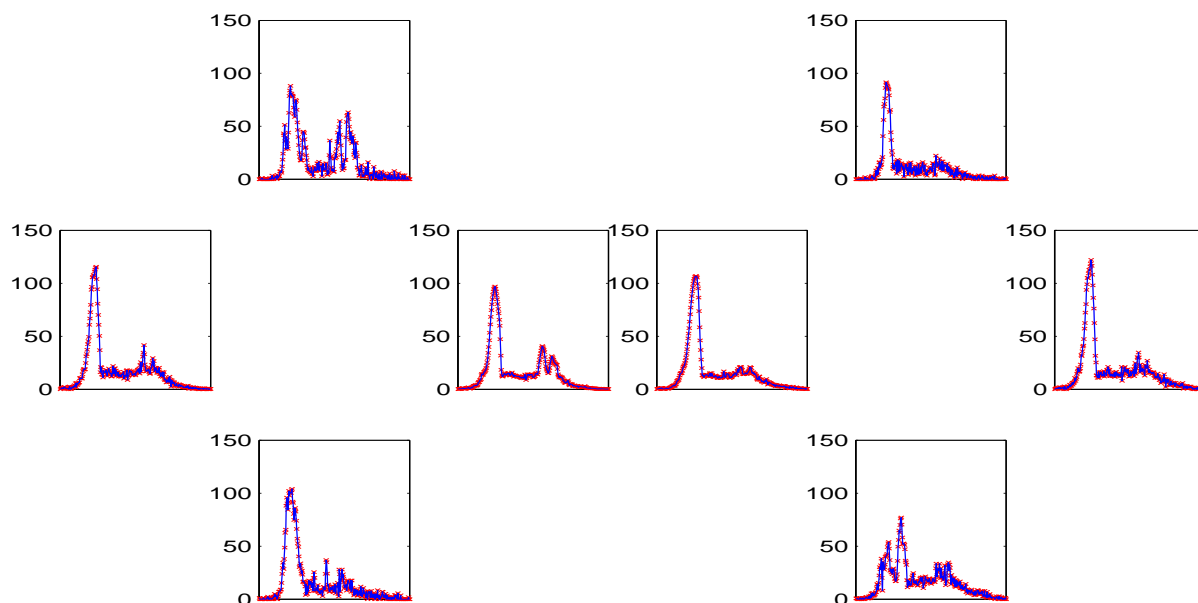
Obrázek 24: Horizont 3 - rovnoměrné váhy ramen, na horizontu preference nejvzdálenějších



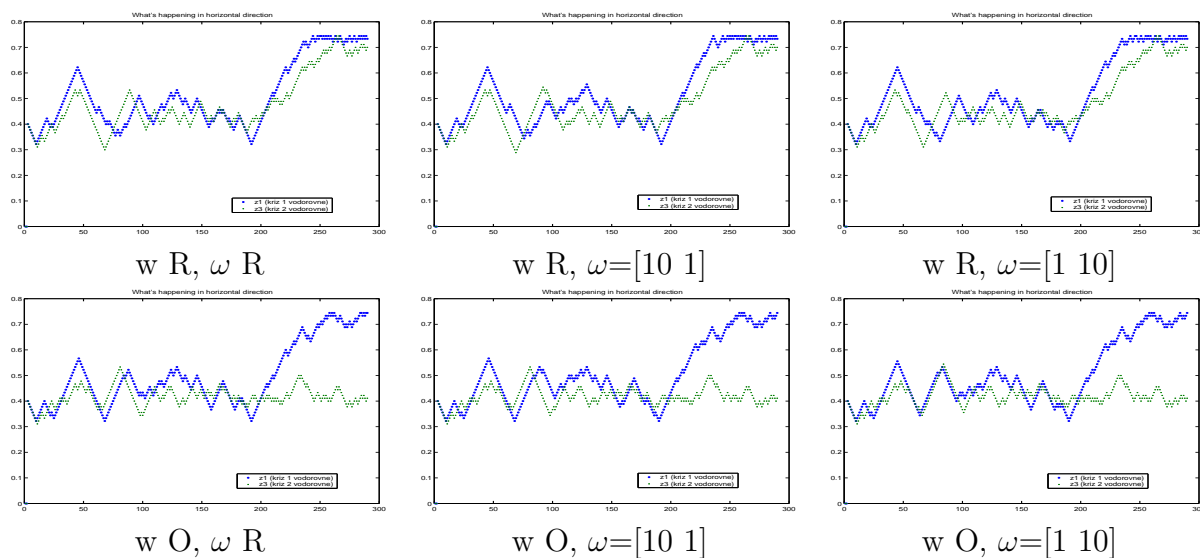
Obrázek 25: Horizont 3 - nerovnoměrné váhy ramen



Obrázek 26: Horizont 3 - nerovnoměrné váhy ramen, na horizontu preference nejbližších



Obrázek 27: Horizont 3 - nerovnoměrné váhy ramen, na horizontu preference nejvzdálenějších



Obrázek 28: Horizont 3 - relativní zelené ve vodorovném směru



## 5 Závěr

Závěrem lze jednoznačně říci, že zavedením optimálních vah na ramenech došlo k výraznému zlepšení z hlediska rovnoměrnosti kolon v oblasti i z hlediska minimalizace jejich délky. Na uvedeném simulovaném případě je také vidět, že optimalizace na delším horizontě rovněž přináší viditelný efekt v řízení. Naopak malé rozdíly byly pozorovány při změnách vah na horizontě, ale lze podle zjištěných hodnot rozptylu průměrných délek kolon na jednotlivých ramenech říci, že lepších hodnot bylo dosaženo při váhové preferenci časově nejvzdálenějších budoucích kolon.

## 6 Literatura

- [1] P. Jirava a P. Slabý, *Pozemní komunikace 10 - Dopravní inženýrství*, Vydavatelství ČVUT Praha, 1997.
- [2] P. Příbyl a R. Mach, *Řídicí systémy silniční dopravy*, Vydavatelství ČVUT Praha, 2003.
- [3] P. Příbyl a M. Svítek, *Inteligentní dopravní systémy*, BEN - technická literatura, Praha, 2001.
- [4] V. Peterka, “Bayesian approach to system identification”, in *Trends and Progress in System Identification (P. Eykhoff ed.)*, pp. 239–304. Pergamon Press, Oxford, 1981.
- [5] Ch. Diakaki, V. Dinopoulou, K. Aboudolas, and M. Papageorgiou, “Deliverable 9: Final system development report, ist-2000-28090”, in *Signal Management in Real Time for urban traffic NETWORKS*. Technical University of Crete, 2002.
- [6] M. Papageorgiou, Ch. Diakaki, V. Dinopoulou, A. Kotsialos, and Y. Wang, “Review of road traffic control strategies.”, in *Proceedings of the IEEE*, December 2003, vol. 91, pp. 2043 – 2067.
- [7] C. Diakaki, *Integrated control of traffic flow in corridor networks*, Ph.D. thesis, Department of Production Engineering and Management, Technical University of Crete, Chania, Greece, 1999.
- [8] J. Mück, “Using detectors near the stop-line to estimate traffic flows”, *TEC*, , no. December, pp. 429–434, 2002.
- [9] J. Kratochvílová and I. Nagy, “Bibliographic Search for Optimization Methods of Signal Traffic Control”, Tech. Rep. 2081, ÚTIA AV ČR, Praha, 2003.
- [10] J. Kratochvílová and I. Nagy, “Traffic control of microregion.”, in *CMP'04: MULTIPLE PARTICIPANT DECISION MAKING, Theory, algorithms, software and applications*, J. Andryšek, M. Kárný, and J. Kracík, Eds., Adelaide, May 2004, pp. 161 – 171, Advanced Knowledge International.
- [11] J. Kratochvílová a I. Nagy, “Model dopravní mikrooblasti”, *Automatizace*, vol. 47, no. 12, pp. 752–758, 2004.
- [12] J. Kratochvílová and I. Nagy, “Traffic model of a microregion”, in *IFAC World Congress, Preprints*, IFAC, Ed. IFAC, Prague, 2005, accepted.
- [13] J. Kratochvílová a I. Nagy, “Lokální řízení městské dopravy.”, Tech. Rep. 2101, ÚTIA AV ČR, Praha, 2004.
- [14] J. Kratochvílová a I. Nagy, “Sestavení obecné metodologie pro zadávání lineárního modelu dopravní mikrooblasti.”, Tech. Rep. 2105, ÚTIA AV ČR, Praha, 2004.

- [15] Ch. Diakaki, M. Papageorgiou, and K. Aboudolas, “A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control”, *Control Engineering Practice*, vol. 10, pp. 183 – 195, 2002.
- [16] P. Příbyl, “Model dopravní mikrooblasti”, *Automatizace*, vol. 47, no. 12, pp. 741–744, 2004.