

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Simulační studie  
Celulární Automat v dopravě

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
1.1	Kontext a motivace . . . . .	2
1.2	Význam studie . . . . .	2
1.3	Metodika a ověření výsledků . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Fakta</b>	<b>2</b>
2.1	Zdroje faktů . . . . .	2
2.2	Hypotézy . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Koncepce modelu</b>	<b>3</b>
3.1	Zjednodušení . . . . .	3
3.1.1	Maximální rychlost . . . . .	3
3.1.2	Zjednodušení reakcí řidičů . . . . .	3
3.1.3	Náhodné zpomalení jako zjednodušená reakce na externí faktory . . . . .	3
3.1.4	Diskretizace prostoru . . . . .	3
3.1.5	Diskretizace času . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Model celulárního automatu pro simulaci dopravy</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Výsledky experimentů</b>	<b>5</b>
5.1	Experiment 1: Nízká hustota provozu . . . . .	5
5.2	Experiment 2: Střední hustota provozu . . . . .	6
5.3	Experiment 3: Vysoká hustota provozu . . . . .	7
5.4	Nalezení kritického bodu . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>8</b>

# 1 Úvod

Tato studie se zaměřuje na pohyb automobilů na jednopruhovém silnici, který je důležitým tématem nejen pro odborníky, ale také pro běžné řidiče. Denně čelíme dopravním zácpám a nepravidelnému provozu, což vyvolává otázku: Jak dochází k přechodu od plynulé jízdy k dopravním zácpám?

## 1.1 Kontext a motivace

Motivací této práce je hlubší porozumění mechanismům, které stojí za těmito dopravními jevy na jednopruhovém silnici. Zajímá mě, jak různé faktory, jako je hustota vozidel, ovlivňují celkový tok dopravy.

## 1.2 Význam studie

V rámci této práce jsem se zaměřil na modelování dopravy na silnici pomocí celulárního automatu. Tento přístup umožňuje simulovat dopravní toky na základě jednoduchých pravidel. Mým cílem je zkoumat, jak se mění dopravní chování při různých hustotách vozidel na jednopruhovém silnici a jak se vytvářejí typické dopravní vzory, jako jsou vlny start-stop.

## 1.3 Metodika a ověření výsledků

Výsledky této studie jsem ověřoval porovnáním s již existujícími články, které se týkají pohybu automobilů na jednopruhovém silnici. Chtěl jsem zjistit, zda model dobře odráží skutečný provoz na silnicích a zda může být použit k předpovídání dopravních vzorů v reálných situacích.

# 2 Fakta

## 2.1 Zdroje faktů

K porozumění dané problematice jsem se obrátil na řadu odborných článků, jako například [1]. Především jsem chtěl zjistit, jak správně definovat model a jak zajistit, aby byl validní. Při svém dalším průzkumu jsem narazil na další zajímavé práce, jako například [2]. Ale nakonec jsem našel práci, která je základem mé simulační studie, protože vysvětluje úplné základy modelování jízdy aut na přímém úseku cesty [3].

Pro zajištění validity mého modelu jsem shromáždil všechna potřebná fakta týkající se implementace celulárního automatu pro simulaci pohybu aut. Klíčové aspekty tohoto modelu zahrnují:

1. Zrychlení vozidel: Vozidla se zrychlují v reakci na prostor před sebou až do dosažení maximální rychlosti. [3].
2. Zpomalení vozidel: Vozidla zpomalují v reakci na ostatní vozidla nebo překážky na silnici. [3].
3. Náhodné zpomalení: Náhodné faktory, jako je chování řidiče, mohou vést ke snížení rychlosti vozidla. [3].
4. Pohyb vozidel: Vozidla se pohybují na základě své aktuální rychlosti. [3].

Kromě toho, zkoumal jsem jevy, které se mohou stát na silnici se zvýšením hustoty vozidel. [4] Jeden z takových jevů je start-stop vzorec. V dokumentu, na který se odkazuje, je popsán jev známý jako jamiton, který se vyskytuje na silnicích s vyšší hustotou vozidel. Jamiton je start-stop vzor pohybu vozidel, který vzniká v důsledku zesílení malých nestabilit v dopravním toku. Tento vzor se projevuje vytvořením vlny, která se může pohybovat v protisměru na silnici.

## 2.2 Hypotézy

1. **Hypotéza o zrychlení:** Při nižší hustotě provozu vozidla dosáhnou maximální rychlosti kvůli většímu prostoru před sebou.
2. **Hypotéza o zpomalení:** V hustém provozu dochází k častějšímu zpomalení vozidel, což vede k vyšší pravděpodobnosti vzniku jevu start-stop a k zácpám.
3. **Hypotéza o zvětšení start-stop vln:** Při růstu hustoty aut se vlny start-stop stávají většími a slévají se.
4. **Hypotéza o existenci kritického bodu hustoty:** Existuje určitá hodnota hustoty, při níž začínají vznikat start-stop vlny (lokální zácpy).

## 3 Koncepce modelu

### 3.1 Zjednodušení

V rámci vývoje modelu celulárního automatu pro simulaci dopravy jsem provedl několik zjednodušení, aby byl model efektivnější a srozumitelnější, zatímco stále zachovával klíčové charakteristiky dopravního toku.

#### 3.1.1 Maximální rychlost

Předpokládám, že všechna vozidla v modelu mají stejnou maximální rychlost ( $v_{max}$ ). Toto zjednodušení umožňuje snazší matematickou analýzu a simulaci, jelikož redukuje počet proměnných a ulehčuje výpočty. V realitě mohou mít vozidla různé maximální rychlosti, ale pro účely této simulace předpokládám, že rozdíly v maximální rychlosti mezi vozidly nejsou dostatečně významné, aby ovlivnily celkové chování systému.

#### 3.1.2 Zjednodušení reakcí řidičů

Model předpokládá okamžitou reakci řidičů na změny v dopravním toku bez zpoždění. V reálném světě existuje určité reakční zpoždění, ale jeho zahrnutí by výrazně zkomplikovalo model. Pro účely této simulace je předpokládáno, že toto zpoždění je dostatečně malé a nemá významný vliv na výsledky modelu.

#### 3.1.3 Náhodné zpomalení jako zjednodušená reakce na externí faktory

Model zahrnuje náhodné zpomalení vozidel, což je zjednodušené zastoupení různých externích faktorů, jako jsou povětrnostní podmínky, individuální rozdíly v chování řidičů nebo malé překážky na silnici. Toto zjednodušení pomáhá simulovat určitou míru nepředvídatelnosti a variabilitu v chování dopravy, aniž by bylo nutné modelovat každý možný externí faktor.

#### 3.1.4 Diskretizace prostoru

V mém modelu celulárního automatu jsem prostorovou komponentu silnice reprezentoval pomocí jednoduchého pole. Každý prvek tohoto pole představuje jednu buňku celulárního automatu, která může být buď obsazena vozidlem, nebo prázdná. Toto pole tedy slouží jako zjednodušená abstrakce silnice, kde pozice každého vozidla je určena jeho umístěním v konkrétní buňce pole.

Délka pole reprezentuje celkovou délku simulované části silnice. Například, pokud pole má 100 prvků a každý prvek reprezentuje 1 metr silnice, celková simulovaná délka silnice je 100 metrů. Vozidla

v modelu se pohybují vpřed nebo zůstávají na místě v závislosti na pravidlech celulárního automatu, a jejich pozice se v každém časovém kroku aktualizuje podle těchto pravidel.

Je důležité poznamenat, že silnici jsem udělal cyklickou, což znamená, že vozidla, která opustí konec simulovaného úseku silnice, se objeví na začátku, což umožňuje simulaci nekonečné silnice.

### 3.1.5 Diskretizace času

Čas v modelu je také diskretizován. To znamená, že simulace postupuje v pevně stanovených časových intervalech, neboli krocích. Každý krok reprezentuje určitý úsek času, například jednu sekundu. Během každého časového kroku se aktualizuje stav každé buňky (segmentu silnice) podle pravidel celulárního automatu.

V každém kroku je tedy vyhodnoceno, zda vozidlo zrychlí, zpomalí, nebo zůstane ve své aktuální rychlosti a pozici, a poté se případně posune do další buňky vpřed na základě své rychlosti. Tímto způsobem model postupně simuluje pohyb vozidel po silnici.

## 4 Model celulárního automatu pro simulaci dopravy

Při vytváření modelu byl kladen důraz na použití celulárního automatu pro efektivní simulaci dopravních toků. Hlavní výhodou celulárních automatů je jejich schopnost modelovat diskrétní změny stavů v čase, což je ideální pro simulaci dopravy.

1. **Zrychlení vozidel:** Pokud je aktuální rychlost vozidla  $v$  menší než maximální rychlost  $v_{\max}$ , rychlost se zvýší o jednu jednotku. Matematicky lze vyjádřit jako:

$$v = \min(v + 1, v_{\max}) \quad (1)$$

2. **Zpomalení (kvůli jiným vozidlům):** Pokud vozidlo na pozici  $n$  zaznamená další vozidlo na pozici  $n + k$  a vzdálenost  $k$  je menší než jeho aktuální rychlost  $v$ , sníží vozidlo svou rychlost na hodnotu  $k$ . Toto pravidlo lze zapsat jako:

$$v = \begin{cases} k, & \text{pokud } k < v \\ v, & \text{jinak} \end{cases} \quad (2)$$

3. **Náhodné zpomalení:** S pravděpodobností  $p$  se rychlost vozidla sníží o jedna, pokud je vyšší než nula. Vzorec pro tento proces je:

$$v = \begin{cases} v - 1, & \text{s pravděpodobností } p \\ v, & \text{s pravděpodobností } 1 - p \end{cases} \quad (3)$$

4. **Pohyb vozidla:** V každém kroku simulace se vozidlo posune na novou pozici v závislosti na jeho aktuální rychlosti. Nová pozice  $n$  je dána vztahem:

$$n = n + v \quad (4)$$

Tyto pravidla se vykonávají paralelně pro všechna vozidla v každém kroku simulace.

5. **Prostorová reprezentace:** Prostor pro simulaci je reprezentován jako cyklická jednopruhá dráha (matice), přičemž každý prvek matice symbolizuje určitý úsek silnice.
6. **Hustota vozidel:** Hustota vozidel, označovaná jako  $\rho$ , je určena vztahem:

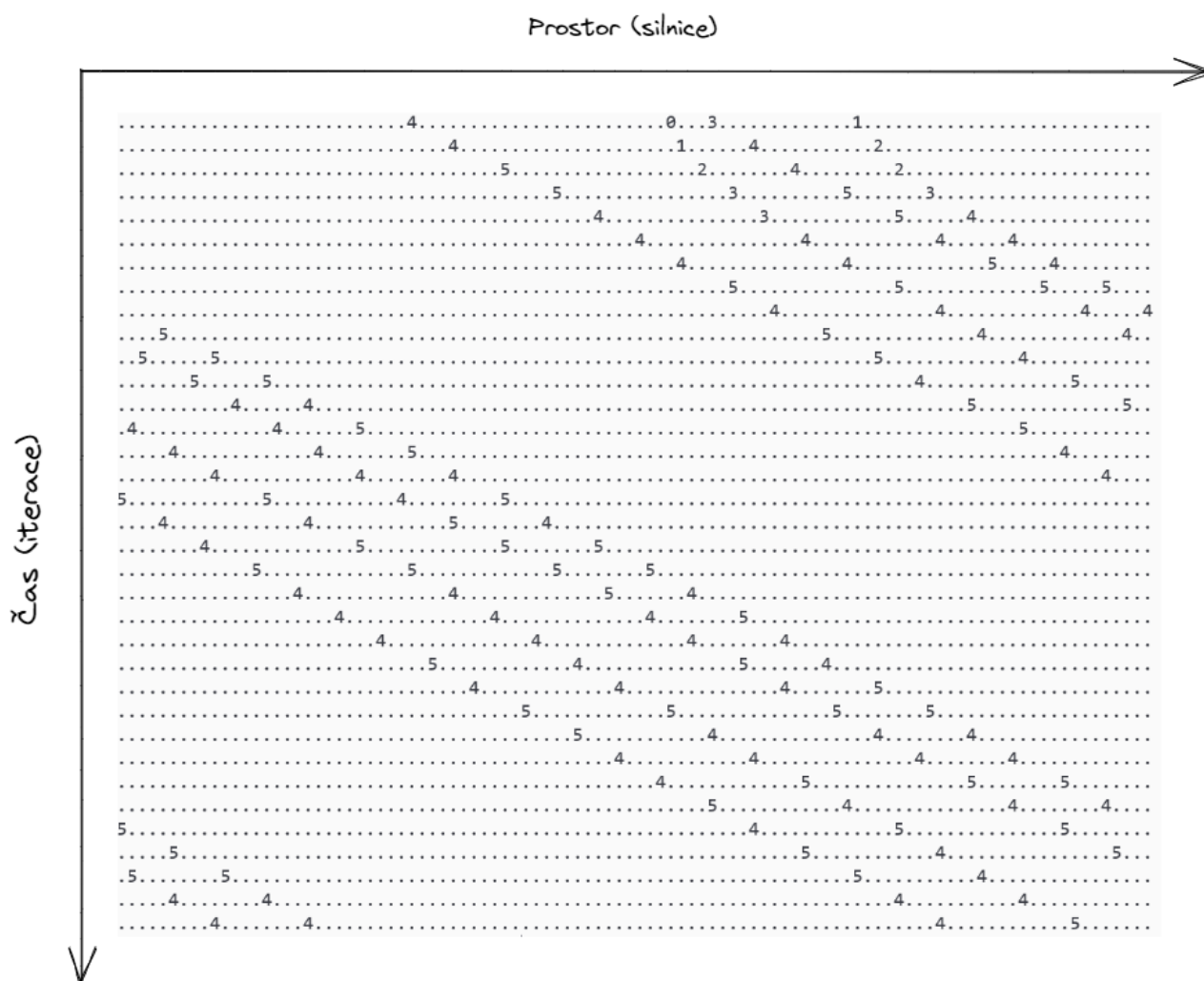
$$\rho = \frac{\text{Počet obsazených buněk}}{\text{Celkový počet buněk}} \quad (5)$$

## 5 Výsledky experimentů

V této sekci jsou prezentovány výsledky tří experimentů, které byly provedeny s různými hustotami provozu: nízká (0.04), střední (0.2) a vysoká (0.8). Každý experiment je vyhodnocen s ohledem na stanovené hypotézy o dynamice dopravního toku. Grafy výsledků jsou zobrazeny níže, kde:

- Tečky reprezentují prázdná místa.
- Čísla na grafech označují jak polohu vozidel, tak jejich rychlost.
- Na y-ové ose jsou vyznačeny jednotlivé iterace simulace, odshora dolů.
- Na x-ové ose je vyznačen prostor, a pohyb vozidel je zleva doprava.

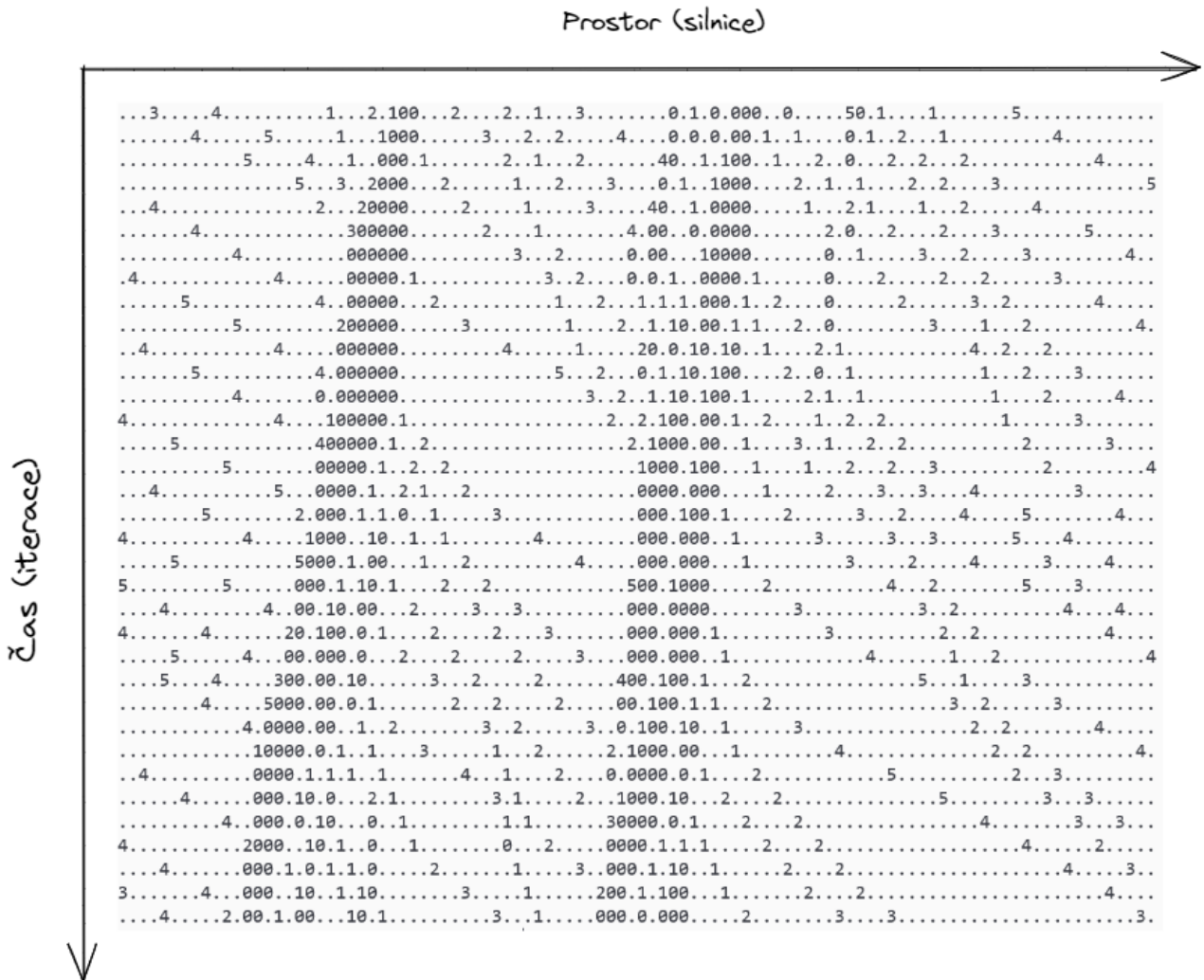
### 5.1 Experiment 1: Nízká hustota provozu



Obrázek 1: Dopravní tok při nízké hustotě 0.04

Při nízké hustotě bylo pozorováno, že vozidla dosahují maximální rychlosti bez významného zpomalení, což koresponduje s hypotézou o zrychlení. Vozidla se pohybují s minimálním omezením, což vede k plynulému dopravnímu toku bez výrazných jevů start-stop a zácp.

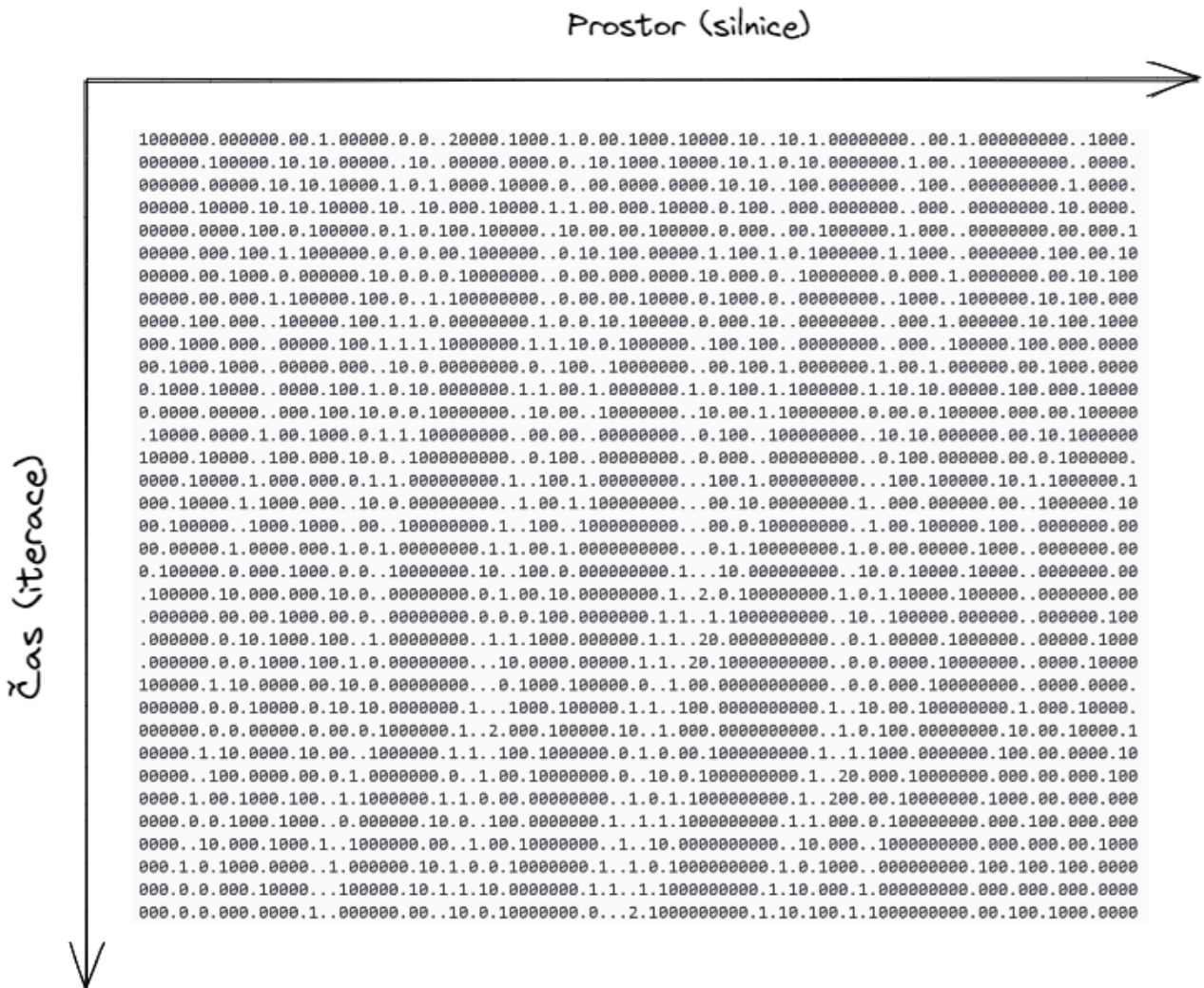
## 5.2 Experiment 2: Střední hustota provozu



Obrázek 2: Dopravní tok při střední hustotě 0.2

S rostoucí hustotou provozu se začínají objevovat zpomalení vozidel, jak bylo předpovězeno hypotézou o zpomalení. Tato zpomalení vede ke vzniku start-stop vln, což je videt na obrázku číslo 2.

### 5.3 Experiment 3: Vysoká hustota provozu



Obrázek 3: Dopravní tok při vysoké hustotě 0.8

Při vysoké hustotě provozu jsou pozorovány rozsáhlé jevy zpomalení a start-stop vln, které splývají a tvoří rozsáhlé zácpy. To je v souladu s hypotézou o zvětšení start-stop vln, kde se tyto jevy stávají výraznějšími a spojují se do velkých zábran v toku vozidel.

### 5.4 Nalezení kritického bodu

Identifikace kritického bodu hustoty je klíčovým krokem k pochopení dynamiky dopravního toku v modelu celulárních automatů. Kritický bod odpovídá hodnotě hustoty, při které dochází k přechodu od volného toku vozidel k režimu, kde se formují start-stop vlny a dochází k výraznému snížení průtoku vozidel.

Na základě analýzy simulovaných dat byl kritický bod hustoty identifikován prostřednictvím vyhodnocení průměrných průtoků při různých hustotách vozidel. Průtok nejprve stoupal s rostoucí hustotou, avšak po překročení určité hodnoty hustoty došlo k poklesu průtoku. Tento bod, kde průtok dosahuje maxima, je označován jako kritický bod a byl odhadnutý v oblasti hustoty  $p \approx 0.085$ , jak je zobrazeno na grafu 4. Tento graf je nazýván "Fundamental Diagram of Traffic Flow" [5] (Základní



diagram dopravního toku). Kritický bod se může lišit v závislosti na různých faktorech, například počtu pruhů. Pro jednopruhový pohyb automobilů je tato hodnota stanovena na  $\approx 0.085$ .



Obrázek 4: Fundamentální diagram ukazující průtok vozidel v závislosti na hustotě.

## 6 Závěr

V rámci této práce jsem se věnoval modelování dopravního toku pomocí celulárního automatu s cílem lépe porozumět dynamice dopravy při různých hustotách vozidel. Mým záměrem bylo zkoumat, jak faktory, jako je hustota vozidel, ovlivňují chování dopravy.

Z výsledků provedených experimentů vyplynulo několik důležitých závěrů:

- Při nízké hustotě provozu dominuje plynulý dopravní tok bez výrazných zácp a start-stop vln.
- S rostoucí hustotou provozu dochází ke zvýšení zpomalení vozidel a vzniku start-stop vln.
- Při vysoké hustotě provozu jsou zácpy a rozsáhlé start-stop vlny běžné a průtok vozidel klesá.

Důležitým prvkem této práce bylo také nalezení kritického bodu hustoty, kde dochází ke změně dynamiky dopravy. Tento kritický bod byl identifikován kolem hodnoty hustoty přibližně 0.085.

Věřím, že tyto poznatky mohou přispět k lepšímu porozumění chování dopravního toku a mohou být pro společnost užitečné při plánování a řízení dopravy.

## Odkazy

- [1] *Simulation of Signalized Intersection with Non-Lane-Based Heterogeneous Traffic Conditions Using Cellular Automata*. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/03611981231211317>.
- [2] *Cellular Automata Intersection Model*. URL: <https://d-nb.info/1207033383/34>.
- [3] *Traffic Modeling - Phantom Traffic Jams and Traveling Jamitons*. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2012/717085/>.
- [4] *Traffic Modeling - Phantom Traffic Jams and Traveling Jamitons*. URL: <https://math.mit.edu/traffic/>.
- [5] *Fundamental diagram of traffic flow*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fundamental\\_diagram\\_of\\_traffic\\_flow](https://en.wikipedia.org/wiki/Fundamental_diagram_of_traffic_flow).