



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## KONCEPT POČÍTAČOVÉHO SIMULAČNÍHO MODELU ŘÍZENÍ AGV VOZÍKŮ V MATERIÁLOVÉM TOKU

CONCEPT OF A COMPUTER SIMULATION MODEL OF CONTROL OF AGV TRUCKS IN MATERIAL FLOW

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Štěpán Fůkal

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Urbánek

BRNO 2024



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Štěpán Fůkal**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení  
Vedoucí práce: **Ing. Michal Urbánek**  
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Koncept počítačového simulačního modelu řízení AGV vozíků v materiálovém toku**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Vypracování literární rešerše popisující typy a využití automatizovaných AVG vozíků. Návrh konceptu materiálového toku v distribučních skladech s využitím automatizovaných třídících systémů pro maloobjemové zásilky. Vytvoření počítačového modelu v programu Plant Simulation. Provedení sady simulačních experimentů dle stanovené matice experimentů pro validaci a verifikaci simulačního modelu.

### **Cíle bakalářské práce:**

Rešerše používaných AGV vozíků a jejich technických parametrů.  
Rešeršní rozbor aktuálních trendů automatizovaných třídících systémů.  
Návrh koncepce a layoutu řízení AGV dle vstupních parametrů.  
Počítačový simulační model vytvořené koncepce.  
Sestavení matice experimentů a provedení simulačních experimentů s cílem validace a verifikace modelu.

### **Seznam doporučené literatury:**

BANGSOW, Steffen. Tecnomatix Plant Simulation. 2nd ed. New Your: Springer, 2020, ISBN 978-3-030-41543-3.

PINKER, Alexander a Marco Prügelmeyer. Innovationen in der Logisitk. 1. Auflage, Huss-Verlag, 2021,ISBN 978-3-948001-75-9.

NOCHE, Bernd a Mathias BÖS. Simulation der Transportverkehre. MAYER, Gottfried, Carsten PÖGE, Sven SPIECKERMANN a Sigrid WENZEL, ed. Ablaufsimulation in der Automobilindustrie [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020, 2020-03-14, s. 155-171 [cit. 2020-10-06]. ISBN 978-3-662-59387-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-59388-2\_11.

WENZEL, Sigrid a Matthias WEIß. Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg, 2008. ISBN 978-354-0352-761.

ZEIGLER, Bernard P. Theory of modelling and simulation. New York: Wiley, c1976, xxii, 435 p. ISBN 04-719-8152-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

V návaznosti na rostoucí požadavky na efektivitu a automatizaci v oblasti intralogistiky se tato bakalářská práce zaměřuje na návrh a optimalizaci řízení AGV vozíků v rámci automatizovaného třídícího systému. V teoretické části jsou popsány rozdíly mezi AGV a AMR vozíky, jejich konstrukční provedení, navigační metody a přehled hlavních výrobců těchto technologií. Praktická část práce se soustředí na návrh a vytvoření simulačního modelu překladiště bez skladovací kapacity v prostředí softwaru Tecnomatix Plant Simulation. V rámci modelu byly realizovány experimenty s různými metodami řízení AGV vozíků, které se lišily v nastavení prioritního chování vozíků na křižovatkách a ve sdílených úsecích. Cílem experimentů bylo nalézt takový způsob řízení, který zajistí nejvyšší propustnost systému. Součástí práce je i verifikace a validace modelu pomocí analytického výpočtu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

AGV, AMR, simulační model, Tecnomatix Plant Simulation, optimalizace, analýza, intralogistika, překladiště.

## ABSTRACT

In response to increasing demands for efficiency and automation in the field of intralogistics, this bachelor thesis focuses on the design and optimization of AGV control within an automated sorting system. The theoretical part describes the differences between AGV and AMR vehicles, their structural designs, navigation methods, and provides an overview of the main manufacturers of these technologies. The practical part is focusing to the design and creation of a simulation model of a cross-docking facility without storage capacity, developed in the Tecnomatix Plant Simulation software. Within the model, a series of experiments was conducted using various AGV control methods, differing in how vehicle priority was set at intersections and shared segments. The aim of the experiments was to determine the control method that would ensure the highest system throughput. The thesis also includes verification and validation of the simulation model using analytical calculations.

## KEYWORDS

AGV, AMR, simulation model, Tecnomatix Plant Simulation, optimization, analysis, intralogistics, cross-docking.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FŮKAL, Štěpán. *Koncept počítačového simulačního modelu řízení AGV vozíků v materiálovém toku*. Online, bakalářská práce. Michal URBÁNEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165303>.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Urbánka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 21. května 2025

.....

Štěpán Fůkal

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Michalu Urbánkovi za jeho odborné vedení, cenné připomínky, ochotu a podporu během celého zpracování práce. Jeho pomoc mi velmi usnadnila orientaci v tématu a přispěla k dosažení konečné podoby práce. Poděkování patří také mé rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu po celou dobu studia.

# OBSAH

<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Automatické a autonomní vozíky</b> .....	<b>11</b>
1.1 Rozdíly mezi AGV a AMR .....	11
1.1.1 Systémy navádění .....	12
1.1.2 Využití a výhody .....	12
1.2 Rozdělení vozíků .....	13
1.2.1 Tažné vozíky.....	13
1.2.2 Podjezdové vozíky.....	14
1.2.3 Vidlicové vozíky .....	14
1.2.4 Zakázkové vozíky.....	15
1.3 Výrobci .....	16
1.3.1 Toyota Material Handling .....	16
1.3.2 Linde Material Handling .....	17
1.3.3 Scott .....	18
1.3.4 Asseco CEIT .....	19
1.3.5 Servis Control.....	19
1.3.6 SSI Schäfer .....	20
<b>2 Trendy automatizovaných třídících systémů</b> .....	<b>21</b>
<b>3 Praktická část</b> .....	<b>24</b>
3.1 Návrh koncepce a layoutu .....	24
3.2 Simulační model .....	26
3.2.1 Vstupní část .....	26
3.2.2 Třídící část .....	28
3.2.3 Výstupní část .....	33
3.3 Stanovení simulačních experimentů .....	34
3.4 Analýza a vyhodnocení experimentů .....	37
3.5 Validace a Verifikace .....	40
3.6 Rozšíření experimentů.....	43
<b>Závěr</b> .....	<b>45</b>
<b>Použité informační zdroje</b> .....	<b>46</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b> .....	<b>48</b>
<b>Seznam příloh</b> .....	<b>49</b>

## ÚVOD

V současné době dochází v oblasti průmyslu a logistiky k významnému posunu směrem k vyšší míře automatizace a digitalizace procesů, související s nástupem konceptu Průmysl 4.0. Tento vývoj je reakcí na rostoucí požadavky na zefektivnění materiálových toků, zvýšení produktivity práce, snížení provozních nákladů a zajištění větší bezpečnosti při spolupráci těchto systémů s lidmi. Jedním z nástrojů k dosažení těchto cílů je zařazení autonomních vozíků typu AGV a AMR tam, kde lze nahradit tradiční způsoby přepravy především uvnitř výrobních a logistických prostor.

AGV systémy jsou dnes běžně využívány k automatizaci přepravních úloh v rámci intralogistiky, a to zejména v prostředích s pravidelným a opakovaným tokem materiálu. Hlavními výhodami těchto systémů je schopnost pracovat v nepřetržitém provozu, eliminují potřebu obsluhy a mají vysokou přesnost při přepravě nákladu. Stále častěji se AGV využívají v prostředí distribučních center, výrobních hal i skladů. Současně však s jejich nasazením roste potřeba efektivního řízení těchto systémů, a to především v podmínkách s nedostatečným prostorem, kde dochází ke kolizním situacím. Právě volba vhodné metody řízení AGV představuje významný faktor pro dosažení vysoké propustnosti systému.

Cílem této bakalářské práce je návrh a ověření funkčnosti počítačového simulačního modelu automatizovaného logistického bodu, který využívá AGV vozíky pro třídění a přepravu zásilek. Model je vytvořen v prostředí softwaru Tecnomatix Plant Simulation a slouží k experimentálnímu testování různých způsobů řízení AGV vozíků. V rámci simulačních experimentů je sledován vliv konkrétních metod řízení na výkonnost celého systému, a to především z hlediska jeho prostupnosti.

Práce tak přináší prakticky využitelný podklad pro návrh a optimalizaci autonomních logistických systémů již existujících a může sloužit i pro budoucí aplikace AGV v reálném provozu.

# 1 AUTOMATICKÉ A AUTONOMNÍ VOZÍKY

AGV (Automated Guided Vehicle) a AMR (Autonomous Mobile Robot) jsou samohybnými vozíky pohybujícími se pomocí senzorů po vlastní trajektorii. Po několik desetiletí slouží ke značnému zvýšení efektivity materiálového toku v logistických centrech, kde odpadávající potřeba operátorů vozidel a neustálý provoz vedou ke snížení nákladů na provoz. [1]

Samohybné vozíky jsou v současné době využívány a značně rozšiřovány v případech, kde je kladen důraz na produktivitu, spolehlivost a bezpečnost provozu. Díky rozvoji technologií, jako jsou umělá inteligence a strojové učení, se samohybné vozíky (AGV a AMR) stávají stále sofistikovanějšími [1]. Moderní AMR systémy se navíc dokážou přizpůsobovat změnám v prostředí v reálném čase, což jim umožňuje flexibilnější pohyb a efektivnější plánování trasy. [1]

S tím, jak se technologie AGV a AMR postupně vyvíjejí, tak se zvyšuje jejich dostupnost, a mohou se uplatňovat i v menších provozech a skladech [2]. Díky nabídce dodavatelů vyrábět AGV a AMR dle potřeb zákazníka přinášejí tyto samohybné systémy velkou míru adaptace na potřeby provozu což je klíčové pro udržení konkurenceschopnosti.

## 1.1 ROZDÍLY MEZI AGV A AMR

AGV a AMR vozíky na první pohled vypadají velmi podobně a vzájemnou konstrukcí se téměř neliší, jejich hlavní rozdíly spočívají především v jejich navigačních možnostech. Tyto rozdíly jde velmi dobře vidět například při objíždění překážky.

Pokud se na předem definované trase AGV objeví překážka, vozík zastaví a nejběžněji zvukovým signálem bude upozorňovat na překážku, dokud nebude odstraněna. [3] Na rozdíl od AGV se AMR díky své technologii dokážou efektivně vyhýbat překážkám, které zaregistrují a následně objedou vhodnou trajektorii (viz obr. 1). [4]



Obr. 1 AVG a AMR vozík [5]

### 1.1.1 SYSTÉMY NAVÁDĚNÍ

#### NAVIGAČNÍ SYSTÉMY PRO AGV

Automatické vozíky jsou vybavené senzory a řídicími jednotkami pomocí nichž se pohybují po předem dané trase.

Běžně se využívá navádění podle drátu zafrézovaného do podlahy nebo pomocí magnetického pásku. AGV používají magnety a senzory s Hallovým efektem k udržení přesné navigace. [6] Tato metoda je schopna odolávat rušení a poskytuje stabilní navigaci i při vysokých rychlostech. [7]

Dále jsou využívány inerciální naváděcí systémy, které určují změnu polohy vozíku bez interakce s okolím a pohybují se po předem naprogramované trase. Tyto systémy kombinují kodéry, čtečky, senzory a inerciální měřicí jednotky. Využívá se například čteček RFID, které se používají pro kalibraci lokace vozíku a tím zvyšují přesnost a flexibilitu navigace. [8]

#### NAVIGAČNÍ SYSTÉMY PRO AMR

Autonomní roboti používají pokročilé navigační systémy, které zahrnují optimální plánování trasy a vylepšenou detekci překážek využívají algoritmů a strojového učení. Tyto systémy jsou vybaveny pokročilými senzory, radary a kamerami, které v reálném čase mapují prostředí a díky tomu se mohou volně pohybovat. [4]

Navíc využívají decentralizované rozhodování, to AMR na rozdíl od AGV umožňuje nezávisle komunikovat s jinými systémy a vede k dynamičtějším reakcím na změny prostředí. Tato decentralizace podporuje flexibilnější operace v intralogistice. [9]

### 1.1.2 VYUŽITÍ A VÝHODY

Trasy AGV často vyžadují rozšířenou infrastrukturu, ve které jsou pevně dané jejich trasy a případná změna těchto tras je časově náročná a stojí podniky další náklady, to může vést k narušení provozu v celém podniku. [4] Proto jsou AGV vhodnější pro stálé a neměnné provozy, ideálně pro podniky s velkým materiálovým objemem s opakujícími se úkoly. [3]



Obr. 2 Příklad aplikace magnetického pásku [10]

Bez nutnosti výstavby pevných tras, často AMR představují levnější možnost do materiálového toku. Navíc prostřednictvím softwaru jsou roboti schopni upřednostňovat zakázky a přiřazovat úkoly, podle jejich polohy, dostupnosti a důležitosti požadovaného materiálu [2]. Při pohledu na jejich výhody se AMR zdají být univerzálním řešením do jakéhokoliv podniku, ve kterém je možnost využití. Hlavním přínosem se AMR stávají pro firmy s vysoce dynamickým prostředím, kde ke změnám provozu stačí poměrně jednoduché softwarové úpravy a případné nahrání nové mapy. [4]

## 1.2 ROZDĚLENÍ VOZÍKŮ

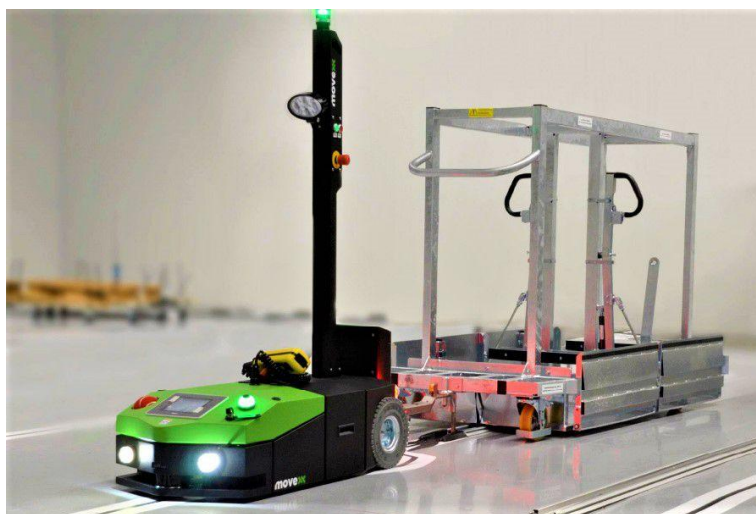
Na trhu se objevuje spousta výrobců a dodavatelů autonomních vozíků v různých provedeních a s různými konstrukcemi, které mají často vlastní názvy svých modelových řad. Avšak většinu modelů můžeme podle konstrukce a účelu použití zařadit do tří základních skupin.:

- Tažné vozíky.
- Podjezdové vozíky.
- Vidlicové vozíky.

### 1.2.1 TAŽNÉ VOZÍKY

Tahače představují velmi efektivní vozíky pro doplňování materiálu ve výrobě, protože jsou schopné přepravovat více palet najednou [11]. Vozíky jsou určeny pro přepravu nejen palet, ale i k tažení různých nákladů, včetně košů a jiných vozíků s naloženými výrobky. Tahače jsou často vybaveny automatickým přípojným zařízením, které umožňuje automatické odpojení nebo připojení od vozíku, a tím zvyšují míru samostatnosti. [12]

Vozíky nabízí vysokou modularitu, hlavně v rozpětí taženého nákladu. Velikost nákladu se nejběžněji pohybuje od 1 300 kg do 5 000 (8 000) kg [11]. U některých výrobců jsou v nabídce také tahače na zakázku, které dokáží převážet náklady o hmotnosti několika desítek tun, konkrétně například 29 000 kg. [12]



Obr. 3 AGV tažný vozík [13]

### 1.2.2 PODJEZDOVÉ VOZÍKY

Podjezdové vozíky, jiným jménem také podbíhací, paletové nebo plošinové vozíky slouží k přepravě materiálu na krátké nebo střední vzdálenosti [13]. Přeprava probíhá tak, že vozík vjede pod paletu, nebo přepravní stůl, a nadzvedne jej svojí plošinou. Poté je možno přepravit materiál na místo určení a vozík spustí přepravní stůl zpátky na zem.

Předností podjezdových vozíků je především jejich vysoká manévrovatelnost a všestranná pohyblivost, vozíky jsou schopné se otáčet na místě [11]. Jejich minimální rozměry a schopnost přesného a plynulého navádění i při vyšším zatížení, dělají z podjezdových vozíků ideální řešení do provozů s omezenými a stísněnými prostory. [14]



Obr. 4 Podjezdové vozíky od výrobce Asseco CEIT [15]

Vhodné především do nepřetržitého provozu, poskytují vozíky vysokou míru přizpůsobení [15]. Výrazná flexibilita tohoto typu vozíků je dána jejich možností aplikace na spoustu typů přepravek aplikací plošinového adaptéru. Tento adaptér napomáhá k větší stabilitě při přepravě. [13]

### 1.2.3 VIDLICOVÉ VOZÍKY

Pokud jsou v nabídce vidlicové vozíky, jedná se většinou o vysokozdvizné AGV vozíky, které jsou vhodné pro všechny druhy manipulace s materiálem jak ve výrobě, tak i distribuci [12]. Autonomní vysokozdvizné vozíky dokážou nahradit většinu operací tradičních vysokozdvizných vozíků, ať už jde o dopravu zboží od podlahy k podlaze, do regálu nebo dokonce do dvojité hloubky regálu. [12]

Výrobci dodávají vozíky v širokém výběru variant. Hmotnost přepravovaného materiálu se pohybuje od 800 kg do 2 500 kg, a výška zdvihu so standartně pohybuje do 4,7 metrů [11]. Automatizované retraky jsou schopny skladovat materiál až do výšky 11 metrů, což vede ještě k větší kapacitě skladu. [11]



Obr. 5 Typy vysokozdvížných autonomních vozíků [11]

Díky svým pokročilým sensorům nahrazení operátorů autonomními vozíky vede ke zvýšení efektivity a bezpečnosti celého provozu [12]. Zvláště ve skladech s vysokoúrovňovým skladováním aplikací vozíků můžeme výrazně předejít chybě lidských operátorů.

#### 1.2.4 ZAKÁZKOVÉ VOZÍKY

Na trhu se nachází velké množství dodavatelů, kteří řeší kompletní projekty podle potřeb zákazníka, to vede někdy k požadavkům a nutnosti upravit některé ze stávajících autonomních vozíků nebo dokonce k vývoji zcela nového AGV [14]. AGV vozíky jsou měněny hlavně kvůli nadrozměrným velikostem nákladu, nezvyklému typu uchycení nebo přílišné hmotnosti převáženého materiálu.

Jeden typ specifikace, kterou může zákazník požadovat je schopnost operovat vozíky ve venkovních prostorách. Vozíky jsou speciálně navrženy, aby odolávaly venkovním podmínkám. Mimo jiné podmínky návrh vozíku zohledňuje především rozdílné teploty, terén, vlhkost a déšť [12]. Venkovní AGV umožňují pohodlnou přepravu mezi výrobními halami.



Obr. 6 Speciální AGV na přepravu hutního materiálu [16]

Také častou úpravou bývá změna hlavních rozměrů vozíků, protože je potřeba navádění AGV vozíků přes úzké chodby nebo složité koridory.

Další z kategorií jsou těžkotonážní AGV, které zvládají manipulaci s nejnáročnějšími břemeny v různých prostředích. Těžkotonážní vozíky lze navrhnout pro většinu aplikací. Ideální jsou do těžkého průmyslu a zároveň mají výhody jako standartní vozidla [12]. Vozíky jsou schopny převážet materiál bez ohledu na jeho teplotu, proto jsou vhodné taky do hutního průmyslu, kde mohou převážet například horké svitky ocelových plechů

### 1.3 VÝROBCI

Na trhu se nachází velké množství dodavatelů zabírající se automatizací výrobních procesů jejichž součástí je také výroba a implementace AGV a AMR. Tito dodavatelé se zaměřují na poskytování komplexních řešení, která obsahují jak samotné stroje, tak i software jejich řízení. Jejich neustálá inovace aktuálních technologií získává konkurenční výhodu v oblasti materiálového toku.

#### 1.3.1 TOYOTA MATERIAL HANDLING

Toyota Material Handling Europe [11] (TMHE) je přední evropský dodavatel manipulační techniky, který je součástí mezinárodní skupiny Toyota Industries Corporation. Společnost se specializuje na výrobu a distribuci vysokozdvíhacích vozíků, paletových vozíků, automatizovaných řešení a dalších technologií pro skladování a logistiku. TMHE, i přes svůj oficiální vznik v roce 2006, staví na téměř 100 letech zkušeností, inovací a nabízí svým zákazníkům široké portfolio produktů a služeb, které pomáhají optimalizovat provoz ve skladech a výrobních závodech napříč Evropou. [11]

Mezi zajímavé produkty TMHE patří inovativní rádiově řízený regálový systém vozíků Radioshuttle. Tyto automatizované satelitní vozíky dosahují nosnosti 1500 kg pro různé nosiče nákladu (především palety) a tvoří vysokohustotní řešení bezuličkového skladování s využitím až 80 % skladovacího prostoru. [11]

Satelitní vozík je umístěn do regálového systému a vozík přepravuje paletu ze vstupu do regálu na její finální pozici. Mezitím na vstup do regálu jsou plné palety přepravovány obsluhou vysokozdvíhacího vozíku nebo AGV a AMR zakladačem.



Obr. 7 Vozíky Toyota Radioshuttle [11]

### 1.3.2 LINDE MATERIAL HANDLING

Dalším z předních světových výrobců a dodavatelů manipulační techniky a logistických řešení je společnost Linde Material Handling [17]. Firma, založená již v roce 1904 v Mnichově, vyvíjí vysoce výkonná řešení toků materiálu, která jsou přizpůsobená jednotlivým potřebám zákazníků a uživatel díky nim může dosáhnout udržitelných konkurenčních výhod. [17]

Nabídka vozíků společnosti Linde zahrnuje zhruba 80 konstrukčních řad s až 20 variantami modelů a přibližně 9000 možnostmi volitelného vybavení. Přičemž každý prodaný kus je vyrobený produkt přímo na potřeby zákazníka, takže se můžete spolehnout, že nedostanete zastaralý model z regálu. [17]



Obr. 8 Autonomní zakladač Linde [17]

Jedním významným produktem z flotily firmy Linde je autonomně jezdící regálový zakladač K-MATIC, který je vhodný i do velmi úzkých uliček bez potřeby dodatečné infrastruktury. Jako automatizovaný logistický vozík způsobuje menší škody na nákladu v porovnání s ručním použitím a hodí se také k manipulaci se zbožím vysoké hodnoty. Automatizovaný vozík je schopen nepřetržitého autonomního provozu a také lze kdykoliv ovládat ručně. [17]

Zakladač je vhodný pro převážení nákladu o hmotnosti až 1450 kg a na vyžádání až do výšky 16 metrů při rychlosti 7,2 km/h. Zakladač má zabudovaný vlastní velmi citlivý bezpečnostní systém, který je vybaven bezpečnostními lasery nezávislými na navigační technice. [17]

### 1.3.3 SCOTT

Scott Automation [12] je mezinárodní společnost specializující se na vývoj a implementaci automatizačních řešení pro různé průmyslové odvětví a působí po celém světě ve dvanácti zemích, mimo státy v severní Americe a Evropě také v České republice. [12]

Firma byla založena na Novém Zélandu v roce 1913 jako strojírenský podnik, která postupem času několikrát změnila svoje zaměření nyní Scott Automation nabízí široké portfolio produktů, zahrnující robotické systémy, automatizované skladové technologie, výrobní linky a řešení pro zpracování materiálů včetně AGV a AMR vozíků. Na vývoj a výrobu technologií AGV vozíků se společnost specializuje již více než 40 let a v jejich schopnostech je navrhnout správné řešení pro potřeby zákazníka, která zvládnou až 40 000 kg až po speciální vozíky v nejnáročnějších výrobních oblastech. [12]

Jedním z projektů firmy Scott byla integrace systému AGV do oblasti potravinářství, kdy bylo potřeba převážet 100 palet se sklem z bodu A do bodu B po složitých trasách. Výsledkem tohoto projektu byl vznik vlečného vozíku zobrazeného na *Obr. 9*. Tento tahač je schopný poskytnout 10 cyklů za hodinu s rychlostí soupravy 1,5 m/s bez zatížení a 1,0 m/s při plném zatížení, tyto rychlosti zaručují bezpečný převoz křehkého materiálu [12]. Tahač je vybaven automatickým připojováním do soupravy s pěti vozíky, přičemž každý z nich je naložen 2 paletami se sklem o celkové hmotnosti nákladu až 29 000 kg. Nepřetržitý provoz ve vnitřních i vnějších prostorách je přerušován jenom minimálními prostoji pro nabíjení. Zařazení do provozu snížilo velikost prostoje výrobní linky na maximálně 2 % času za současného zvýšení bezpečnosti pracovníků. [12]



*Obr. 9* Tahač firmy Scott Automation [12]

### 1.3.4 ASSECO CEIT

Asseco CEIT [15] je technologická společnost, která se od roku 2007 zaměřuje na vývoj inovativních řešení v oblasti průmyslové automatizace. Společnost sídlí na Slovensku a byla založena na půdě Žilinské univerzity, kde do jejího založení probíhal výzkum a vývoj v logistice a robotice. I přes nedlouhé zkušenosti se společnost rychle rozvíjela a dnes je inovačním partnerem. Asseco CEIT v dnešní době nabízí širokou flotilu konkurence schopných AGV vozíků, které jsou vhodným řešením pro společnosti využívající nástroje Industry 4.0. [15]

Nejobstojnějším podjezdovým AGV vozíkem ve flotile společnosti Asseco je model 3200 řady F. Poměrně velké rozměry vozíku (1700 mm x 1300 mm x 600 mm) jsou vykompenzovány jeho nosností převáženého nákladu až 3200 kg, při provozní rychlosti 1 m/s a výšce zdvihu 60 mm a na velikost vozíku také velkou manévrovatelností. Model 3200F je navržen na nepřetržitý provoz do už funkční výrobní linky, nová řada podbíhacích robotů je navíc připravena na 5G technologii. [15]



Obr. 10 Podjezdový vozík od firmy Asseco CEIT [15]

### 1.3.5 SERVIS CONTROL

Společnost Servis Control s.r.o. [14] je česká společnost, specializující se na poskytování komplexní služby v oblasti průmyslové automatizace. Již od svého vzniku v roce 2007 působí na evropském trhu a veškeré zkušenosti, které získali během 15 let v oblasti oprav, integrace robotů, vision systémů, dopravníkových systémů, promítli do vývoje a výroby na míru konstruovaných, autonomních AGV a AMR. V dnešní době již splňují standardy Industry 4.0. pro jejich úspěšně implementované vozíky. [14]

Ve standartní nabídce společnosti Servis Control se nacházejí běžné typy AGV a AMR mezi ně patří jak platformové, tak i tažné a vidlicové stroje. Oproti ostatním výrobcům mají podjezdové vozíky o menší nosnosti a zdvihu, za to mají výrazně menší konstrukci, což jim napomáhá v obratnosti a manévrovatelnosti. [14]

Požadavky zákazníků, podmínky a prostory každé aplikace vedou k nutnosti upravit některé ze stávajících vozíků. Společnost se zabývá integrací a úpravou AGV na dané požadavky a dokážou uspokojit potřebu zákazníka svojí originalitou, tam kde ostatní výrobci nemohli nabídnout řešení. [14]

### 1.3.6 SSI SCHÄFER

SSI Schäfer [18] je přední mezinárodní poskytovatel řešení pro intralogistiku, zaměřený na optimalizaci skladování, manipulaci s materiály a automatizaci v různých odvětvích. Společnost byla založena v roce 1937 v Německu pod jménem "Fritz-Schäfer fabrikmäßige Herstellung von Blechwaren aller Art". Společnost nabízí široké portfolio produktů, které zahrnuje především regálové systémy, automatizované skladové systémy, dopravníky a dopravu pro malé i velké výrobky pomocí AGV. [18]

Společnost spolupracuje se zákazníky z různých odvětví, kde se zaměřuje na vývoj řešení pro jednotlivé zákazníky. Díky svým bohatým zkušenostem jsou schopni optimalizovat logistické problémy a zvyšovat produktivitu výrobních linek. [18]

Ve stále nabídce SSI Schäfer se nachází model podjezdových AGV WEASEL Lite, který představuje ekonomicky výhodné řešení pro malé a střední podniky s požadavkem malých, velmi flexibilních a snadno integrovatelných vozíků. Toto AGV je navrženo pro malé nosiče nákladu do 35 kg, a hlavním rozdílem od řady WEASEL se liší ovládním, přičemž verze Lite komunikuje přes Bluetooth a dostávají příkazy k přepravě přes tablet od osoby na místě kde je materiál potřeba. [18]



Obr. 11 AGV WEASEL Lite [18]

## 2 TRENDY AUTOMATIZOVANÝCH TŘÍDÍCÍCH SYSTÉMŮ

Automatizované třídící systémy integrují nové technické inovace v průmyslu, tento rozvoj je poháněn také díky nástupu e-commerce, který v posledních letech zažil velký růst v běžném životě lidí a vytváří velkou poptávku po zboží. Tím je potřeba zpracovávat každým rokem větší množství zásilek, přičemž velké internetové obchody mnohdy slibují dodání do 24 hodin. Tomuto přispívá nárůst obliby výdejních boxů, preferující až 60 % nakupujících, a neustálé rozšiřování poptávky tlačí na distribuční sklady k rozšíření skladovacích prostor, a především ke zvýšení efektivity a flexibility [19]. Na tyto požadavky dodavatelé reagují a tím vytváří aktuální trendy mezi, které patří například integrace robotiky, AGV a AMR vozíků, aplikování vhodných WMS (Warehouse Management System) a ERP (Enterprise Resource Planning) systémů pomocí kterých lze vytvářet funkční digitální dvojčata. [19]

Společnosti se nejenom snaží vylepšovat celkovou schopnost svých skladů rychle a spolehlivě zpracovávat, třídít a chystat objednávky, ale dochází ke zvyšování skladové kapacity do rozlohy, ale také do výšky [19], například s využitím regálových systémů s možností zajížděcích AGV je schopno dosáhnout využití prostoru 80 % a více [11].

### MOBILNÍ KOLABORATIVNÍ ROBOTICKÁ RAMENA

Jak je zvykem skladové prostory, distribuční centra a výrobní linky kombinují mnoho prvků z automatizace, jako jsou například AGV a AMR vozíky, robotická ramena, inteligentní dopravníky, třídících a segregáčnických systémy a robotické paletizace.

Sloučením a kombinováním těchto prvků, lze dosahovat výkonných a konkurence schopných automatizovaných třídících systémů. Na trhu se začínají objevovat kombinace autonomních mobilních robotů (AMR) a kolaborativních robotických ramen (kobot), která se nejen dají efektivně využít ve třídících systémech, ale mohou být součástí samotného výrobního procesu. Přidání mobility kobotům zvyšuje jejich autonomii a flexibilitu, tím mohou eliminovat úzká místa a usnadňovat nepřetržitý provoz při nedostatku zaměstnanců. Správné zařazení do provozu může vést k minimální potřebě lidské pracovní síly. [20]

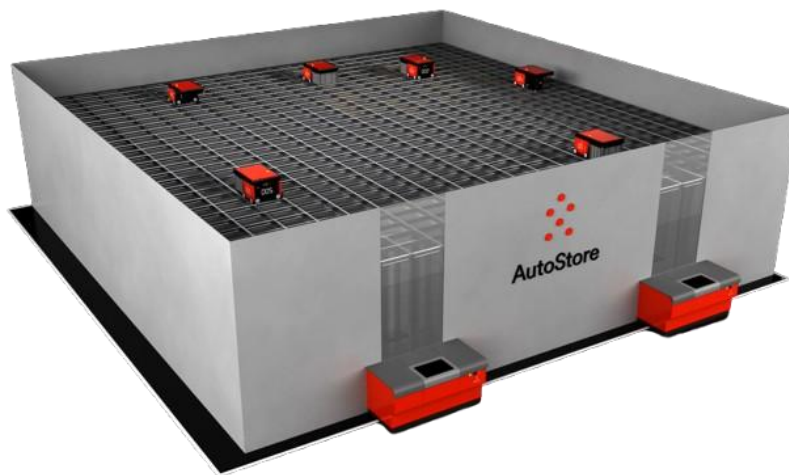


Obr. 12 Mobilní kobot od výrobce MIR [21]

## KUBICKÉ SKLADOVÁNÍ

Po více než 2 desetiletích vývoje kubického skladování se tento systém dostal na český trh poprvé až před 2 lety a od té doby jej integruje stále více firem v Česku i na Slovensku. Tento unikátní typ skladování pracuje na principu vertikálního skladování pomocí stohovatelných plastových beden, které jsou spouštěny automatizovanými vozíky z horní části konstrukce. Úložný prostory skladů mohou bez problémově dosahovat kapacity převyšující 100 000 beden při současném provozu až 120 autonomních vozíků po vrchní části pomocí kolejničky, která je součástí konstrukce. [22]

Výhoda systému, implementována Norskou firmou AutoStore, je schopnost výstavby během plného provozu distribučních skladů a možnost kdykoliv rozšířit aktuální sklady. Výstavba je možná do jakéhokoliv prostoru s dostatečnou výškou a tím poskytuje vysoko hustotní skladování i v prostorech, kde by regálové sklady byly neefektivní. [22, 23]



Obr. 13 Systém kubického skladování firmy AutoStore [23]

## 5G SÍŤ V LOGISTICKÝCH PROVOZECH

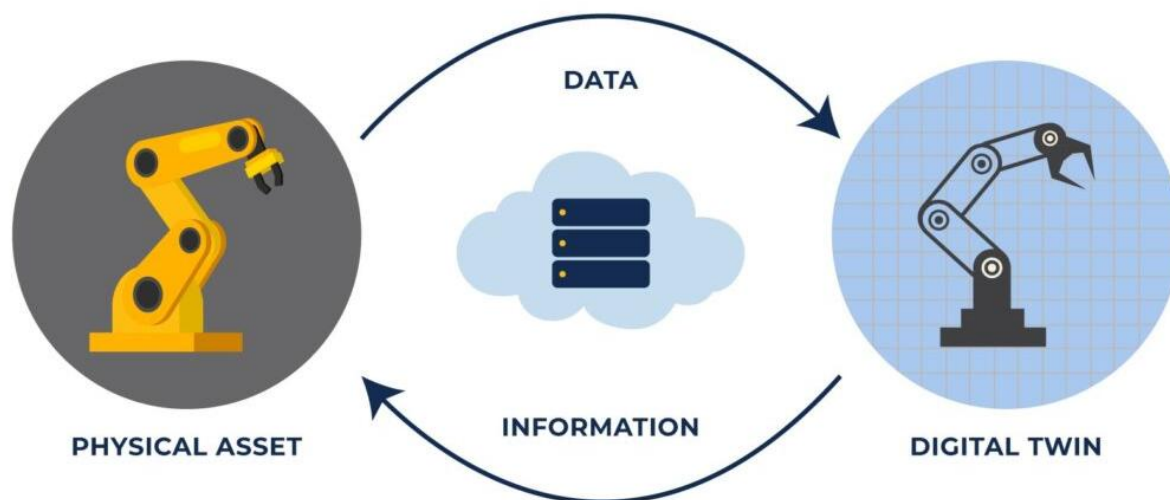
Rozšíření sítí páté generace (5G) se začíná postupně dostávat i do českých podniků, kde jde zatím jen o využití v jednotkách případů, ale například v sousedním Německu se jedná už o stovky případů. Nové 5G technologie lze efektivně využívat nejen při dálkové přepravě, kde zaručují proti aktuálním spojením velmi rychlé, široce dostupné a velmi stabilní připojení, ale také v intralogistice. Ve třídících systémech se začínají využívat privátní 5G sítě, které stejně jako při dálkové přepravě zaručují rychlou a velmi stabilní komunikaci se systémy. Zvláště vhodné jsou do distribučních a třídících skladů, kde aspoň část cest AMR vozíků vedou přes venkovní prostory, kde aktuálně využívané Wi-Fi připojení má zásadní problémy. [20]

Aktuální největší problém je v dostupnosti 5G koncových zařízení, kde verze 5G dosahují vyšších cen, a také celkově vyšší cena 5G sítí. Avšak tento problém můžeme předpokládat jenom za dočasný, kdy s větším zájmem firem bude docházet k větší dostupnosti. [20]

## DIGITÁLNÍ DVOJČE

Digitální dvojče představuje digitalizovaný model fyzického objektu (například robotického ramena viz *obr. 14*) nebo simulaci logistických průběhů. Tento virtuální model je propojen s fyzickým modelem komunikačním kanálem, a pokud je správně vytvořen, tak dokáže samostatně bez lidských zásahů pomocí analýz předcházet problémům a nebezpečí. [22]

Při správné aplikaci je schopno digitální dvojče klidně za plného provozu zvýšit efektivitu, zvýšením průtoku systému, snížení nákladů při stejném průtoku nebo se dá simulovat provoz s nejmenšími emisemi. V logistice hlavní přínos není jenom jako nástroj, který dokáže ukázat průběh logistický operací za určitý čas a odhalit problémy, ale lze využívat jako preventivní nástroj údržby, který sám upozorní na kontrolu strojů nebo dopravních prostředků [24]. V úvahu se ovšem musí vzít, jestli se vyplatí věnovat digitálnímu dvojčeti, jelikož nejdůležitější částí aplikace dvojčete v logistice je nastavení celého systému, k čemu je potřeba mít širokou škálu potřebných dat z WMS a ERP systémů, bez kterých není možné vytvoření dvojčete, které by odpovídalo realitě. [19]



*Obr. 14* Vizualizace digitálního dvojčete [25]

### 3 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část se zaměřuje na návrh a vytvoření simulačního modelu v programu Plant Simulation, který umožní experimentálně zkoumat vliv preferencí řízení autonomních vozíků na celkovou prostupnost systému. Hlavním cílem praktické části je zjistit, zda a jak velkým způsobem ovlivňuje metoda řízení AGV vozíků průchodnost systému a jeho celkovou výkonnost.

První krok práce spočívá ve vytvoření základního návrhu koncepce a layoutu, který slouží jako podklad pro vytvoření simulačního modelu. Na základě tohoto modelu je následně sestavena matice experimentů, která obsahuje proměnné parametry ovlivňující řízení autonomních vozíků. Dále jsou na tomto modelu provedeny experimenty s cílem analyzovat různé konfigurace a jejich dopad na efektivitu přepravy materiálu. Následná analýza experimentálních výsledků s cílem identifikovat klíčové faktory, může přispět k optimalizaci řízení autonomních vozidel.

Pozitivní výsledky experimentů přinesou předpoklad, že určitá konfigurace preferencí řízení AGV vozíků je vhodná pro široké spektrum aplikací a výstupy této práce mají praktické využití nejen v optimalizaci stávajících AGV systémů, ale také v návrhu nových autonomních logistických řešení.

#### 3.1 NÁVRH KONCEPCE A LAYOUTU

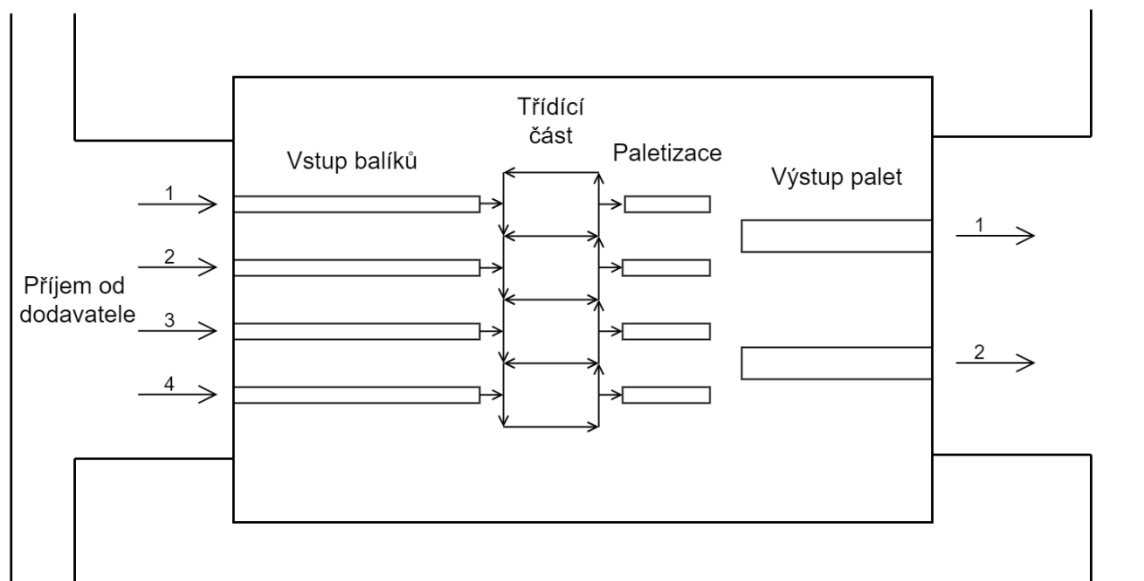
Tato kapitola se věnuje návrhu layoutu simulačního modelu. Koncept layoutu je směřován k vytvoření modelu překladiště. Tento logistický uzel slouží pro efektivní překládání z jednoho dopravního prostředku (nákladní vůz) na druhý, aniž by byla potřeba skladování přepravovaného materiálu. V tomto konkrétním případě se jedná o model jednoduchého překládacího bodu, jehož hlavním úkolem je třídít balíky od dodavatelů a následně je distribuovat do příslušných nákladních vozidel, které rozváží zboží na místo doručení.

Samotný návrh layoutu vychází z předem definovaných parametrů, které určují strukturu a kapacitu modelu. Mezi klíčové parametry patří:

- Počet nákladních vozů na vstupu: 4
- Počet nákladních vozů na výstupu: 2
- Počet balíků na paletu: 12
- Rozměry balíků: 60x40x50 cm
- Typ třídících AGV: Podjezdové AGV

Na *Obr. 15* je vidět návrh konceptu layoutu, ze kterého je tvořen simulační model v programu Plant Simulation. V levé části modelu je znázorněna příjezdová cesta určená pro nákladní vozidla, která se řadí k vykládacím plošinám označeným čísly 1 až 4. Na těchto stanovištích jsou nákladní vozy vykládány pomocí válečkových roztažitelných dopravníků, aby umožňovaly zasunutí přímo do vnitřního prostoru vozidla. Tímto způsobem lze urychlit proces vykládání balíků a minimalizovat manipulace.

V případě, že by materiál byl přepravován na paletách, proces vykládky by se lišil. Palety by byly vykládány pomocí nízkozdvíhových vozíků, které by zajistily jejich přesun do další části. V této sekci by došlo k jejich rozbalení a skládání jednotlivých balíčků na válečkový dopravník, který by pokračoval směrem k třídící části. Pro zjednodušení tohoto procesu by mohly být opět využity teleskopické válečkové dopravníky, které umožní snadnější a plynulejší manipulaci s balíky.



Obr.15 Návrh layoutu simulačního modelu

Každá přepravovaná krabice je opatřena vlastním označením (čárovým kódem) a během převozu na válečkovém dopravníku je kód naskenován. Po naskenování každému balíku je přiřazena konkrétní konečná destinace. Po přiřazení této destinace jsou krabice automaticky transportovány po válečkovém dopravníku až k třídící části. Samotný proces třídění je realizován pomocí autonomních AGV vozíků, které se pohybují po trasách vyznačených magnetickým páskem. Každý AGV vozík je schopný reagovat na destinaci přepravovaného zboží a zvolí si optimální cestu.

Během pohybu AGV vozíků nesmí dojít k žádné kolizi s jinými vozidly, materiálem nebo s překážkami v prostředí. Celý systém je navržen tak, aby se AGV vozíky řídily podle specifických preferencí, které jsou detailně stanoveny v kapitole věnované experimentům. Proces nakládky a vykládky balíčků na AGV vozíky může být realizován několika různými způsoby v závislosti na vlastnostech a velikosti přepravovaného zboží. Jednou z možností je, že vozík jednoduše podjede pod balík, nadzvedne ho a poté ho přepraví na cílové místo kde ho položí na připravený dopravník. Pokud by balíky měly různé rozměry mohly by se do procesu zapojit robotická ramena, které by balíky přesně nakládaly a vykládaly podle potřeby.

Jakmile AGV vozík dorazí na místo určení, robotické rameno vyloží balík a předá ho na pásový dopravník, který jej automaticky dopraví do paletizační části logistického toku. V této části probíhá skládání balíků na standardizované europalety EUR1 o rozměrech 1200x800x144 mm. Na základě zadaných parametrů jsou balíky skládány do tří vrstev, přičemž každá vrstva bude obsahovat čtyři balíky. Po sestavení kompletní palety jsou balíky zajištěny proti pohybu pomocí ochranné fólie, která zabezpečí balíky během přepravy.

Připravené palety jsou následně pomocí vidlicového vozíku přemístěny na dopravník umístěný v úrovni podlahy. Tento dopravník souží k přepravě palet směrem k nakládací rampě a zároveň plní roli dočasného skladu před jejich naložením do nákladních vozů. Důležitým parametrem návrhu tohoto systému je dostatečná kapacita dopravníku nebo zajištění alternativního skladovacího řešení. Nákladní vozy přijíždějí k nakládacím plošinám v určitých intervalech, které se mohou ve skutečnosti výrazně prodloužit, a pokud by skladovací kapacita nebyla dostatečná, mohlo by dojít k blokování celého překladiště.

## 3.2 SIMULAČNÍ MODEL

Tato kapitola se věnuje tvorbě simulačního modelu. K jeho realizaci na základě návrhu layoutu byl využit software Tecnomatix Plant Simulation od společnosti Siemens, což je nástroj určený k modelování, simulaci a optimalizaci výrobních procesů a jejich analýze výkonnosti a průchodnosti ještě před jejich realizací. Plant Simulation poskytuje velkou nabídku předdefinovaných objektů, jako jsou dopravníky, výrobní stanice nebo robotická ramena. Tyto prvky lze vzájemně propojovat, přizpůsobovat konkrétním požadavkům a doplňovat o vlastní logiku programováním v jazyku SimTalk, který je součástí softwaru s možností programování jednotlivých prvků.

Základem pro tvorbu simulačního modelu jsou vstupní data z předchozí kapitoly návrhu layoutu. Pro lepší přehlednost je výsledný simulační model rozdělen do několika částí, přičemž jednotlivé segmenty jsou v následujícím textu detailně popsány. Kompletní simulační model překladiště je přiložen v příloze I.

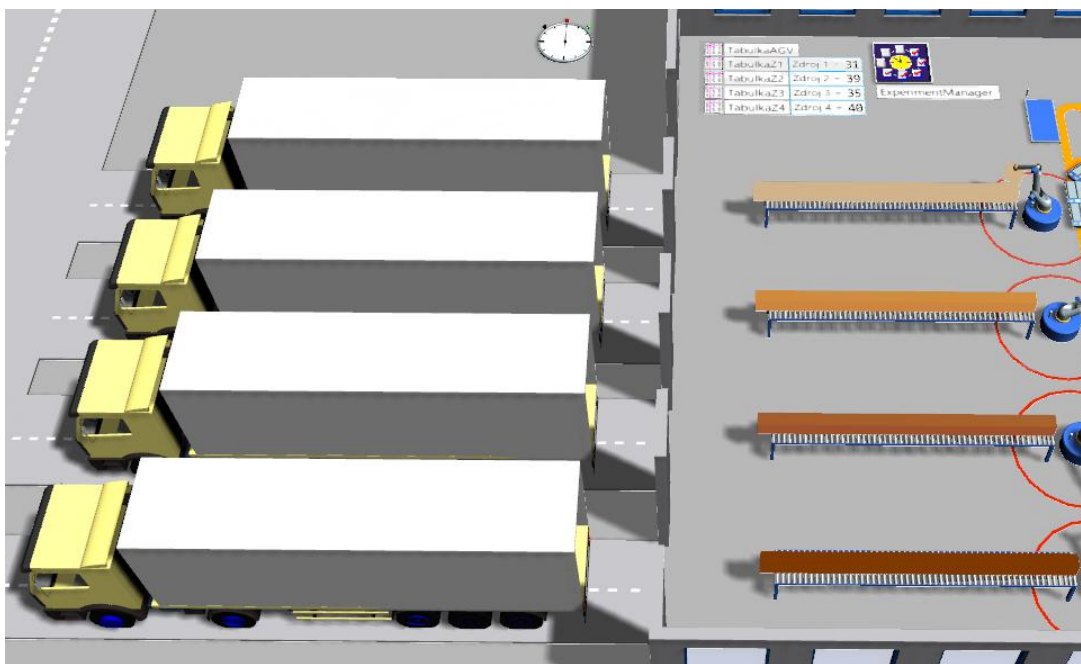
### 3.2.1 VSTUPNÍ ČÁST

Na vstupní části systému je přistaven nákladní vůz, který zajišťuje dodávku balíků od dodavatelů. V simulačním modelu jsou nákladní vozy přímo napojeny na válečkové dopravníky, čímž se zajišťuje jejich nepřetržité zásobování a plynulý tok materiálu. Jakmile jsou balíky přemístěny na dopravníky, jejich další pohyb probíhá pomocí robotických ramen na základě aktuálního požadavku, a balíky dále směřují do třídící sekce modelu.

Na *Obr. 16* je zobrazena část příjmu simulačního modelu, jdou zde vidět pod sebou umístěny čtyři nákladní vozy, přičemž každý z nich generuje čtyři různé typy balíků. Pro usnadnění analýzy materiálového toku jsou balíky z jednotlivých vozidel odlišeny různými barvami, a hlavně pomáhají sledování pohybu jednotlivých zásilek v průběhu simulace a usnadňují určit, zda nějaký typ krabic nemá problém s průchodem v modelu.

Procentuální rozložení vydaných balíků je řízeno na základě předem definovaných datových tabulek, které jsou propojeny se zdrojem. Tento přístup umožňuje přesnější kontrolu nad distribucí zásilek a případně pomáhá jejich jednoduché úpravě pro experimenty.

Jedním z důležitých parametrů modelu je zajištění nepřetržitého naplnění válečkových dopravníků. Tento požadavek je žádaný pro dosažení relevantních výsledků při experimentech zaměřených na řízení AGV vozíků. V případě, že by došlo k výpadkům v přísunu balíků, mohly by se projevit nežádoucí prostoje, které by zkreslily analýzu kolizních trajektorií vozíků.



Obr.16 Vstupní část simulačního modelu

## URČENÍ DESTINACE

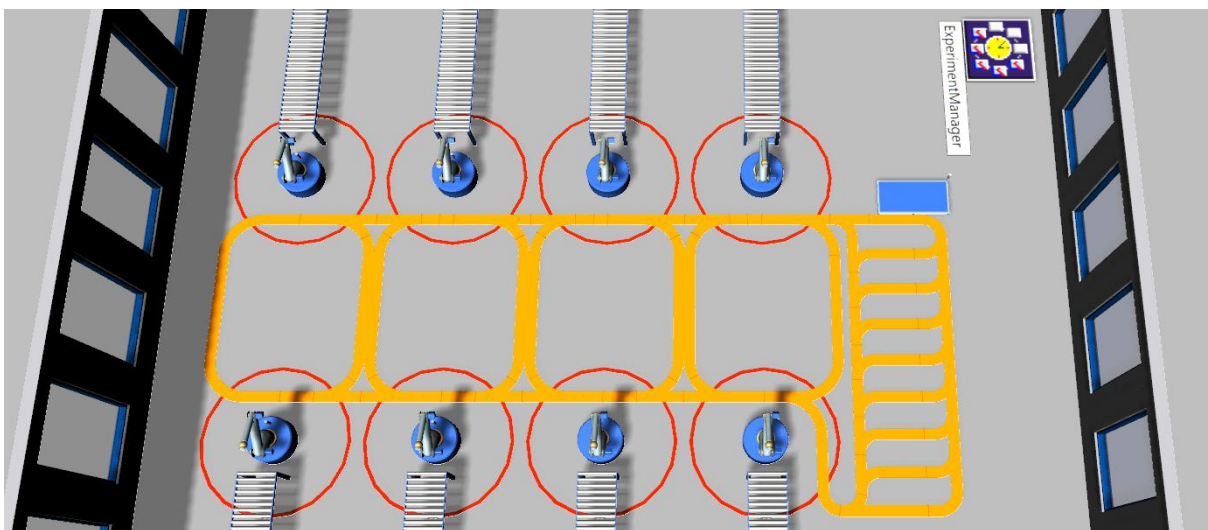
Část na vstupním válečkovém dopravníku, kde dochází ke skenování čárového kódu a přiřazení cílové destinace jednotlivým krabicím, představuje krok, který zajišťuje, že každá připravovaná zásilka je správně identifikována a následně směrována na odpovídající trasu.

V rámci simulačního modelu je však možné tento proces upravit tak, aby bylo zjednodušeno jeho provedení. Namísto skenování čárového kódu na dopravníku může být každé krabici již při vstupu na dopravník automaticky přiřazena informace o její cílové destinaci. To znamená, že v simulaci se bude pracovat s předpokladem, že každá krabice obsahuje tuto informaci (název dílu) již od počátku a směrování jednotlivých balíků k jejich cílovému místu pak bude řízeno na základě jejich názvu, který slouží jako hlavní identifikační parametr.

Ke každému vstupnímu válečkovému dopravníku je přiřazen nákladní vůz, který funguje jako zdroj krabic vstupujících do systému. Tyto krabice jsou generovány se specifickým názvem, který odpovídá jejímu umístění. Proces generování krabic je řízen předem definovanou tabulkou pravděpodobností, která určuje procentuální zastoupení jednotlivých typů zásilek v celkovém toku materiálu.

### 3.2.2 TŘÍDÍCÍ ČÁST

Následující část simulačního modelu se zaměřuje na proces třídění balíků pro zařazení do jejich destinací. V okamžiku, kdy autonomní vozík dorazí k nakládacímu robotickému ramenu (viz *Obr. 17* – horní řada robotů), vyhodnotí svůj aktuální stav a pokud je jeho úkolem převzít balík, vyšle signál k aktivaci ramene. Po přijetí signálu robotické rameno uchopí balík z válečkového dopravníku a přesune jej na AGV. Současně s tímto krokem dostává vozík informaci o cílové destinaci přepravovaného balíku. Na základě této informace mu je přiřazena optimální trajektorie, po které se bude v rámci modelu pohybovat. Směrování vozíku je řízeno tak, aby minimalizovalo čas přepravy a zabránilo kolizím s ostatními jednotkami. Jakmile AGV dorazí na předem určené výstupní místo, systém vyšle signál k aktivaci robotického ramene na výstupní stanici. Robotické rameno následně provede odebrání balíku z AGV a přenesení jej na výložný válečkový dopravník, který zajistí jeho další distribuci.



*Obr.17* Třídící část simulačního modelu

Pro simulační model byl vybrán nejmenší vozík z řady podjezdových vozíků C-Matic, které jdou vidět na *Obr. 18*, od výrobce Linde Material Handling, konkrétně model Linde MH C-Matic 06. Tento vozík byl zvolen především s ohledem na jeho technické parametry, které plně vyhovují požadavkům modelu. Ačkoli by bylo možné zvolit i menší variantu, není v tomto případě specifikována váha přepravovaného materiálu, což nehraje zásadní roli. Klíčové parametry, jako je rychlost nebo poloměr otáčení, jsou navíc srovnatelné s ostatními vozíky v různých váhových kategoriích, což činí tento model vhodnou volbou pro simulaci.

- Nosnost vozíku: 600 kg
- Rozměry vozíku: 956x730x240 mm
- Minimální poloměr otáčení: 478 mm
- Maximální rychlost vozíku: 1,5 m/s
- Kapacita baterie: 36 kWh
- Spotřeba energie: 1 kW
- Nabíjecí výkon: 10 kW



Obr.18 Řada vozíků C-Matic od firmy Linde [17]

### NAKLÁDÁNÍ A VYKLÁDÁNÍ

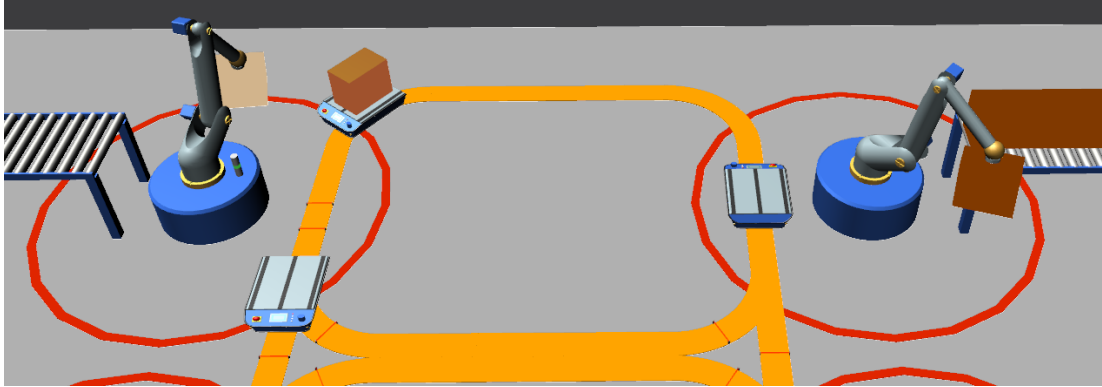
Proces nakládání a vykládání autonomních vozíků je v modelu realizován prostřednictvím robotických ramen (viz obr.19), která reagují na pokyny generované vozíky. Tyto pokyny jsou iniciovány zejména senzory umístěnými na jejich dráze (Track). Každý autonomní vozík během své jízdy aktivuje senzory tím, že přes ně fyzicky přejede. Aktivace senzoru spouští předem definovanou funkci, která vyhodnocuje stav vozíku a tyto funkce jsou naprogramovány v jazyce SimTalk. Každá funkce obsahuje podmínky typu „if-else“, pomocí nichž systém ověřuje, zda je vozík v daném okamžiku prázdný, či zda již přepravuje balík.

Pokud vozík aktivuje senzor umístěného před vykládacím robotickým ramenem a je vyhodnocen jako prázdný, systém vozík bez zastavení propustí dál po trase a rameno nebude nijak reagovat. V opačném případě probíhá kontrola, zda se jméno přepravovaného balíku shoduje s názvy krabic, které mají být na dané stanici vyloženy. Pokud ano, systém pošle signál, který aktivuje robotické rameno. Rameno následně přeloží balík z AGV na pokračující válečkový dopravník. Po dokončení vykládky vozík pokračuje dále ve své cestě k naložení dalších balíků. V případě, že název přepravovaného balíku neodpovídá specifikaci dané stanice, vozík projede kolem senzoru bez aktivace ramene a přesune se k další vykládací stanici, kde se proces opakuje.

Na nakládacích stanicích je řízení senzorů podobná, avšak zde je systém rozšířen o prvek pravděpodobnostního řízení. Pokud k nakládacímu rameni dorazí plně naložené AGV, tak pokračuje plynule dál po své trase. Pokud však vozík dorazí prázdný, systém aktivuje část kódu, ve které je uplatněn pravděpodobnostní parametr rozhodující o tom, zda bude balík naložen. V tom případě že pravděpodobnostní parametr povolí naložení krabice je vygenerován signál, který spustí robotické rameno, které přeloží balík z dopravníku na vozík. Následně AGV pokračuje směrem ke stanici určené k vyložení zásilky. Pokud však výsledek pravděpodobnostní podmínky vyhodnotí, že se balík nemá naložit, vozík pokračuje dále k další nakládací stanici, kde se proces opakuje.

Zavedení pravděpodobnostního parametru do procesu nakládání umožňuje simulovat reálný provoz, kde není rozložení nakládky mezi jednotlivé stanice vždycky rovnoměrné, takže někdy je více využívána stanice 1 a někdy například stanice 3. V rámci simulace je však v širokém časovém úseku dosaženo stavu, kdy každá ze čtyř nakládacích stanic realizuje přibližně 25 % z celkového množství přeložených balíků s možnou odchylkou  $\pm 5$  % z celkového množství, což nám ukazuje jistou přirozenou nerovnoměrnost.

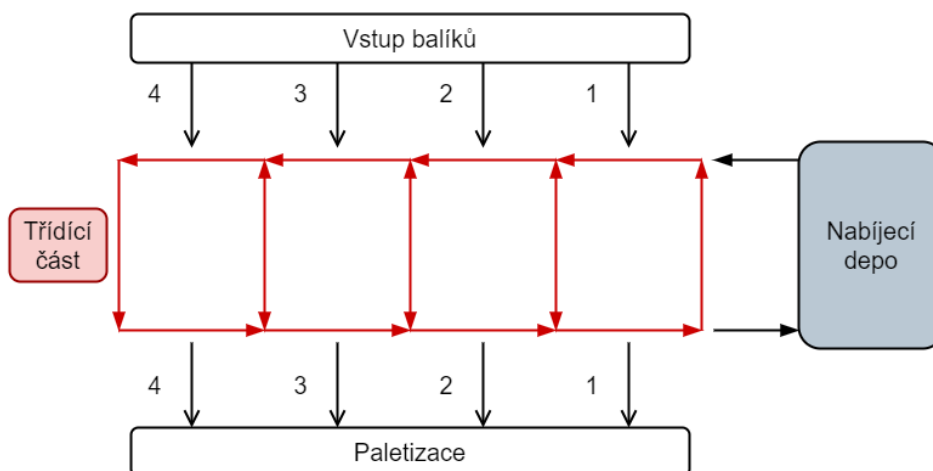
Tento mechanismus tak zajišťuje realističtější průběh simulace. Bohužel by se mohlo stát, že by prázdný vozík prošel nakládací částí bez naložení a z toho důvodu je na poslední stanici pravděpodobnost vyloučena a naložen je každý vozík, který k ní dojde, toto vyloučení zamezí zbytečnému rotování autonomních vozíků



Obr.19 Robotická ramena

## SYSTÉM ŘÍZENÍ AGV

V rámci simulačního modelu je podél celé dráhy třídící části systému AGV rozmístěno celkem 57 senzorů a na každý z nich je napsán jejich vlastní řídicí kód. Z uvedeného počtu se 8 senzorů přímo podílí na procesech spojených s nakládkou a vykládkou zásilek, jak bylo popsáno v předcházející kapitole. Další skupina, tvořená 18 senzory, se nachází na nabíjecím depu, jehož funkčnosti je věnována následující kapitola. Zbývajících 31 senzorů je rozmístěno podél hlavní třídící tratě a primárně se zaměřují na samotné řízení a navigaci autonomních vozíků během jejich přepravy balíků. Během provozu některé z těchto senzorů požadují informaci o nabití autonomního vozíku a v případě malého nabití baterie tak vozík vedou směrem k nabíjecímu depu. Senzorová síť především plní funkci při řízení preferencí v jízdě autonomních vozíků na tratích, kde dochází k jejich křížení či k potenciálním kolizním situacím.



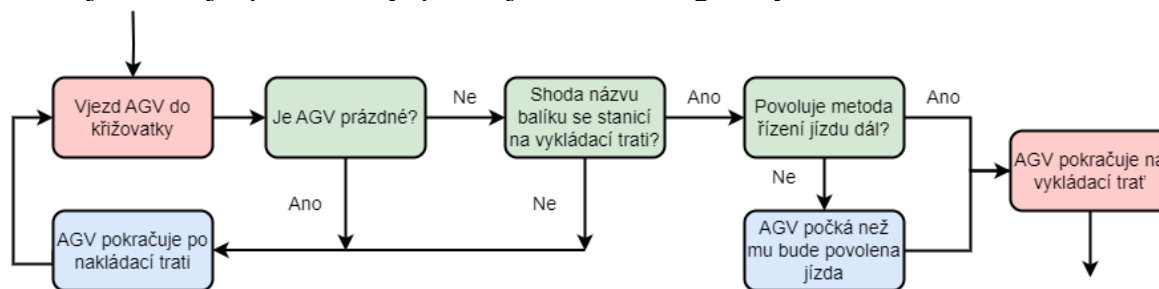
Obr.20 Layout třídící části AGV s šipkami ve směru jízdy

Na *Obr. 20* je schematicky znázorněna třídící trať autonomních vozíků doplněná o směrové šipky, které ukazují možné směry pohybu vozíků k jednotlivým nakládacím a vykládacím stanicím, stejně jako místo vjezdu do nabíjecího depa. Pokud porovnáme *Obr. 20* s modelem zobrazeným na *Obr. 17*, lze si povšimnout zásadního rozdílu v některých úsecích trati, kde jsou použity obousměrné šipky. Tyto části modelu jsou v simulačním prostředí vytvořeny jako dvě paralelní a vzájemně protisměrné dráhy (Track) a představují nejvíce důležité místo z hlediska správného řízení autonomních vozíků.

Jedním ze základních pravidel v těchto úsecích je zamezení lokálních kolizí vozíků na místech, kde dochází ke sbíhání nebo rozbíhání vedlejších tratí s hlavní třídící tratí. AGV vozíky mají v softwarovém prostředí Tecnomatix Plant Simulation již v základním nastavení funkci ochrany proti kolizím v podobě udržování bezpečné vzdálenosti za sebou, přičemž tato vzdálenost obvykle dosahuje řádu jednotek až pár desítek centimetrů.

Problém však nastává v případech, kdy se vozík napojuje na hlavní trať z vedlejší větve, v takové situaci sice respektuje vozík na vedlejší větvi bezpečnostní mezeru vůči vozíku, který jej na trati následuje, nicméně nezaregistruje paralelně projíždějící vozík na hlavní trati. Výsledkem této nedokonalosti základního řízení může být kolizní situace, kdy se vozíky srazí bez jakékoliv chybové hlášky a po následném uvolnění se opět zařadí do provozu. K zamezení tohoto problému je trať v těchto kritických místech rozdělena na menší segmenty, a před tyto místa jsou umístěny senzory, které sledují zaplnění daných segmentů. Pokud senzor zjistí jakýkoliv obsazený segment, systém povolí vjezd na hlavní trať pouze vozíkům, které mají podle definovaných pravidel přednost v jízdě. Tyto priority se stanovují především na základě stavu AGV, primárně se sleduje, zda vozík přepravuje balík. V případě rovnosti podmínek je do systému přidáno pravidlo, typově například jednoduché uplatnění přednosti zprava. Konkrétní nastavení těchto pravidel bude stanoveno v kapitole experimentů.

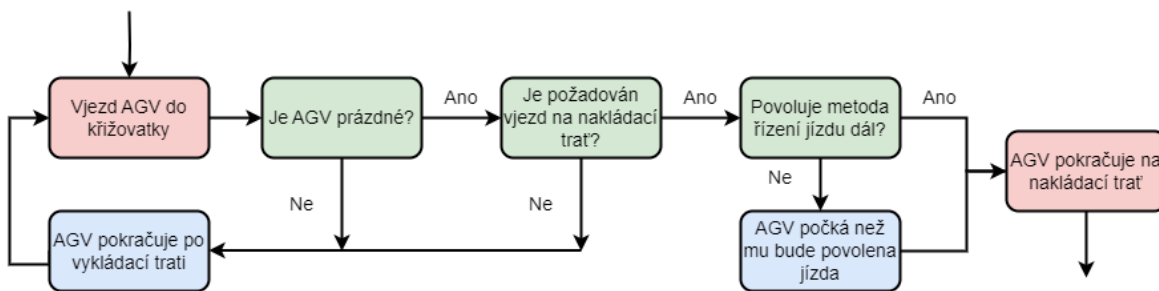
S podobnou problematikou se setkáváme také při odbočování vozíků z hlavní trati do vedlejší větve. V tomto případě je problém řešen funkcí „waituntil“, která zajistí, že vozík smí na odbočující trať vjet pouze tehdy, pokud jsou kolizní segmenty na této trase volné.



*Obr.21* Diagram logiky třídění na nakládací trati

Další podstatnou částí řízení předností je úsek protisměrného provozu vozíků, kde se kříží pohyb prázdných vozíků vracejících se z vykládací části a naložených vozíků směřujících na vykládací stanice (viz *obr. 17*). Na *obr. 21* a *obr. 22* jsou zobrazeny diagramy logiky řízení třídění křižovek před vjezdem do protisměrného provozu. Protisměrné tratě jsou položeny velmi těsně vedle sebe, aby simulace mohla napodobit situace například v logistických halách s nedostatkem prostoru.

Na blízko položených tratích se musí stále plnit podmínka o bezkolizním provozu vozíků, tím pádem je zde stejně jako v předchozích případech trať rozdělena na dostatečný počet segmentů, aby šlo jednoduše kontrolovat polohu AGV vozíku. Na každé straně jsou senzory, které zaznamenávají zaplnění segmentů tratě a v případě, že senzory detekují volnou dráhu, tak jednoduše vozíku povolí vjezd na dráhu. Pokud však některý ze sledovaných segmentů je obsazen, aktivuje se část kódu, která zajišťuje řízení přednosti podle předem daných parametrů. Nejdůležitějším parametrem je opět stav AGV, který kontroluje, zda je vozík naložen nebo prázdný. V některých experimentech může být například preferován vždy prázdný vozík, zatímco v jiných případech bude mít přednost vždy vozík naložený. Konkrétní parametry této volby budou opět stanoveny v kapitole experimentů.



Obr.22 Diagram logiky třídění na vykládací trati

Už byly vysvětleny preference řízení po kolizních dráhách tratí, ale ještě musíme správně vozíky posílat na správné místa. V základním nastavení autonomních vozíků v Plant Simulation je chování při rozdvojení tratí závislé pouze na počtu projetí vozíkem rozdvojením a vozíky jednoduše střídají odbočky. Tento systém by však neumožnil směřování vozíků na správné nakládací či vykládací stanice.

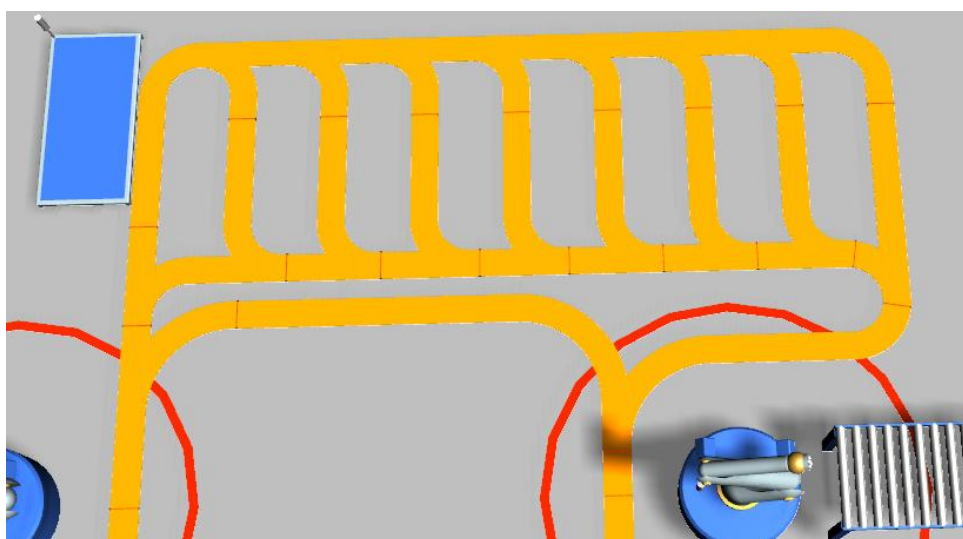
Z tohoto důvodu byly v modelu přidány senzory, které zajišťují přiřazení další destinace každému vozíku. Před každým rozdvojením trati je umístěn senzor, který nejprve zjistí, zda je vozík prázdný, nebo naložený. Pokud je vozík prázdný a nachází se na nakládací části, systém jej nasměruje k další nakládací stanici. Podobně to platí v případě, že je vozík plný a pohybuje se ve vykládací části, v takovém případě je odeslán k další vykládací stanici. Pokud však dojde k situaci, kdy vozík přijíždí k rozdvojení v nakládací části a zároveň je již plně naložen, aktivuje se část kódu, která zjistí název přepravovaného balíku a porovná jej se specifikací v kódu. Pokud se tento údaj shoduje, senzor pošle AGV na trať vedoucí k vykládací části. Pokud ke shodě nedojde, pokračuje vozík dále k dalšímu rozdvojení dále na dráze.

V případě, že vozík již vyložil balík a nachází se stále ve vykládací části systému, je před rozdvojením umístěn další senzor. Tento senzor opět obsahuje pravděpodobnostní parametr. Tento prvek zajistí, aby simulovaná situace byla podobná reálnému provozu, kdy vozíky jezdí po dráze podle přiřazeného úkolu ze systému. Pravděpodobnostní parametr zajistí, že se prázdné autonomní vozíky vrátí zpět na nakládací trať s určitou mírou náhodnosti. Díky tomuto parametru lze simulovat provoz tak, aby každé rameno v průběhu simulace předalo přibližně 25 % z celkového počtu přepravovaných balíků s určitou odchylkou do  $\pm 5$  %.

## NABÍJECÍ DEPO

Aby se dosáhlo reálnějšího provozu jsou všechny vozíky vybaveny bateriemi. Díky tomuto autonomní vozíky vyžadují pravidelné dobíjení a způsobí zpomalení třídění materiálu. Na *obr.23* je znázorněno celé nabíjecí depo včetně zdroje AGV umístěného na levé straně. Tento zdroj je využit na počátku simulace ke vložení vozíků do modelu s různým počátečním nabitím baterií. Nabíjecí depo je vytvořeno dostatečně velké, aby ji bylo možné využít pro široké rozmezí počtu vozíků.

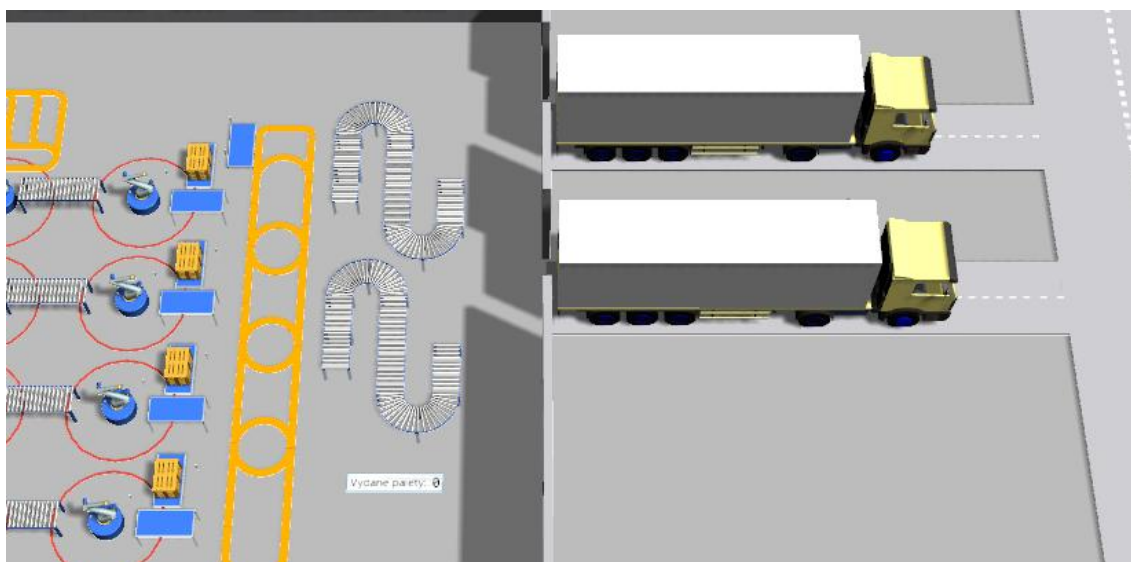
Pro řízení pohybu a samotného procesu nabíjení je depo vybaveno 18 senzory. Z těchto senzorů je 8 přímo určeno pro řízení nabíjecího procesu. Jakmile AGV dorazí k nabíjecímu místu a aktivuje senzor, je pomocí příslušného kódu zastaven a přepnut do stavu nabíjení. Po dosažení plného nabití systém vyšle signál k uvolnění dráhy a vozík se následně napojuje zpět na výstupní trať, která jej vrací na třídící trať. K řízení pohybu AGV s ohledem na jejich stav baterie, jsou po celé třídící trati v senzorech úpravy, které kontrolují úroveň nabití. Pokud u některého vozíku klesne kapacita baterie pod 15 %, začne být AGV směřováno ke vstupu do nabíjecího depa (viz pravá část depa na *obr. 23*). Po vstupu do prostoru depa vozík pokračuje po trase, která jej vede k volné nabíjecí stanici. V případě, že jsou všechny nabíjecí senzory obsazené, vozík vyčkává v zóně před depem, dokud se některá ze stanic neuvolní.



*Obr.23* Nabíjecí depo třídící části

### 3.2.3 VÝSTUPNÍ ČÁST

Po dokončení překládky balíků z autonomních vozíků na válečkový dopravník pomocí robotických ramen jsou balíky přepravovány do závěrečné části systému. Tato výstupní sekce zahrnuje zbylou část celého modelu a jde ji rozdělit na tři navazující části paletizační oblast, přepravu palet na výdejní stanici a dočasné skladování palet před jejich naložením do nákladních vozů. (viz *obr. 24*, zleva doprava).



Obr.24 Výstupní část simulačního modelu

Pro realizaci paletizační části modelu byly využity prvky typu „AssemblyStation“, které slouží k ukládání jednotlivých balíků na palety. Balíky jsou na každé stanici skládány do tří vrstev, přičemž každá vrstva obsahuje čtyři balíky. Samotné ukládání balíků na palety je v modelu prováděno pomocí robotického ramena. Z důvodu zjednodušení však nebyla v modelu vytvořena animace ovinování palet ochrannou fólií, ale pro zachování efektu procesu je však po dokončení skládání balíků na paletu na stanici nastavena časová prodleva, která simuluje dobu nutnou k finálním úpravám palety před jejím odbavením vidlicovým AGV.

Po vychystání jsou palety odváženy z paletizačních stanic pomocí autonomního vidlicového vozíku. Tato menší trať zabezpečuje přepravu palet na jeden ze dvou navazujících válečkových dopravníků. Součástí této trati je rovněž nabíjecí depo, které má místo jen pro nabíjení dvou AGV. Tato kapacita je zvolena jako dostatečná, jelikož při vytváření modelu, simulace potvrdila, že trať není výrazně zatížena a dva vozíky zcela postačují k zajištění přepravy

V závěrečné fázi jsou palety umístěny na výstupní válečkový dopravník, který míří na místo naložení do nákladních vozů. Tento dopravník současně slouží jako přechodný zásobník, jehož cílem je zabránit možnému zablokování toku v případě prodlev způsobených střídáním vozidel na výdejním místě. V reálném provozu by se palety mohly dočasně skladovat podél cesty vedoucí k nakládací zóně nákladních vozidel, v závislosti na prostorových možnostech daného pracoviště.

### 3.3 STANOVENÍ SIMULAČNÍCH EXPERIMENTŮ

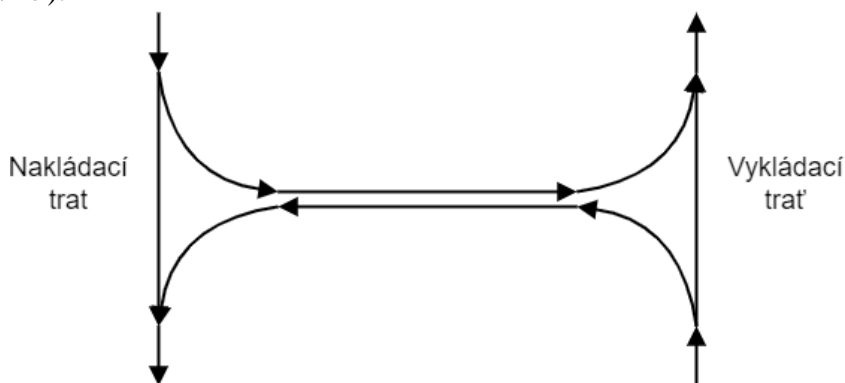
Tato kapitole je věnována vytvoření simulačních experimentů, jejichž výsledky poslouží k následné analýze a k vyhodnocení závislostí mezi vybranými vstupními a výstupními parametry modelu. Prvním krokem je správné vytvoření matice experimentů. Tato matice zahrnuje proměnné vstupní parametry modelu a definuje jejich kombinace, které budou v jednotlivých experimentech testovány s cílem identifikovat vzájemné vazby a míru jejich vlivu na výstupní parametry.

Množství prostoupených položek, které úspěšně projdou systémem, je zvoleno jako hlavní výstupní parametr. Pro lepší představu interpretace výsledků je tento parametr konkretizován jako počet vychystaných palet na výstupní části systému. Délka každého experimentu je stanovena na časový horizont 30 dnů provozu. Tento časový rámec umožňuje získat dostatečně data pro statistické vyhodnocení výsledků.

Výsledky těchto experimentů budou sloužit jako podklad pro další analýzu s cílem najít optimální nastavení systému a navrhnout případné kroky vedoucí k jeho zefektivnění.

### PREFERENCE POHYBU AGV VOZÍKŮ

Do matice experimentů byla jako hlavní proměnná zařazena preference řízení vozíků po trati, která představuje stanovení přednosti průjezdu v úsecích s rizikem kolizí. Tyto strategie řízení jsou aplikovány zejména v třídící části systému, a to především v místech křížení vozíků přijíždějících z nakládacích tratí směrem k vykládacím s vozíky vyjíždějícími z vykládacích tratí (viz obr. 25).



Obr. 25 Diagram preference metod řízení

Metoda 1 – Absolutní přednost plného vozíku. První strategie řízení stanovuje absolutní prioritu pro naplněné autonomní vozíky, zatímco prázdné vozíky jim v každém případě udělují přednost. V úsecích, kde dochází k přejiždění z jedné strany na druhou, má vždy přednost vozík vyjíždějící z nakládací části. Prázdný vozík proto čeká v prostoru před přejezdem, aby bylo zajištěno bezpečné projetí plného vozíku. Stejný princip platí i v místech, kde dochází ke spojování tratí, zde je též upřednostňován naložený vozík. Pouze v situaci, kdy se střetávají dva vozíky se stejným stavem, získává přednost vozík přijíždějící na trať před tím, který se na ni již jede.

Metoda 2 – Absolutní přednost prázdného vozíku. Druhá strategie řízení stanovuje absolutní prioritu pro prázdné autonomní vozíky, zatímco naplněné vozíky jim v každém případě udělují přednost. V úsecích, kde dochází k přejiždění z jedné strany na druhou, má vždy přednost vozík vyjíždějící z vykládací části. Naplněný vozík proto čeká v prostoru před přejezdem, aby bylo zajištěno bezpečné projetí prázdného vozíku. Stejný princip platí i v místech, kde dochází ke spojování tratí, zde je též upřednostňován prázdný vozík. Pouze v situaci, kdy se střetávají dva vozíky se stejným stavem, získává přednost vozík přijíždějící na trať před tím, který se na ni již jede.

Metoda 3 – Přednost prázdného vozíku na nakládací trati a plného vozíku na vykládací trati. Tato strategie řízení třídící tratě je nastavena tak, aby v přejezdové části měly přednost prázdné vozíky vyjíždějící z nakládací části a plné vozíky přijíždějící z vykládací části. V případě, že se na přejezdové části, již nachází autonomní vozík s předností, vozíky z opačné strany tratě vyčkají před přejezdem, dokud přejezd nebude volný, a poté pokračují v jízdě. V oblasti spojení tratí platí obdobné pravidlo jako v předchozích strategiích, přičemž na nakládací trati má přednost prázdný vozík a na vykládací trati má prioritu plný vozík.

Metoda 4 – Přednost plného vozíku na nakládací trati a prázdného vozíku na vykládací trati. Tato strategie řízení třídící tratě je nastavena tak, aby v přejezdové části měly přednost plné vozíky vyjíždějící z nakládací části a prázdné vozíky přijíždějící z vykládací části. V případě, že se na přejezdové části, již nachází autonomní vozík s předností, vozíky z opačné strany tratě vyčkají před přejezdem, dokud přejezd nebude volný, a poté pokračují v jízdě. V oblasti spojení tratí platí obdobné pravidlo jako v předchozích strategiích, přičemž na nakládací trati má přednost plný vozík a na vykládací trati má prioritu prázdný vozík.

## MNOŽSTVÍ AGV

Dalším proměnným parametrem experimentu je počet AGV vozíků na třídící trati, přičemž se vychází z předpokladu, že při nízkém počtu vozíků nebude preference přednosti výrazně ovlivňovat celkovou průchodnost systému.

Během testování bude také nastavena různá úroveň nabití baterií jednotlivých vozíků při vpuštění do simulace, aby se ve stejném okamžiku zabránilo velkému požadavku na dobití AGV. Hodnoty stavu nabití budou procentuálně rozděleny, čímž se zajistí rovnoměrnějšímu zatížení systému.

Do experimentální matice bude zařazena pouze hodnota počtu vozíků, přičemž interval bude nastaven od minimálně 5 vozíků až po maximálně 20, s krokem inkrementu o jeden vozík. Maximální hodnota byla stanovena na základě předpokladu, že průměrný počet vozíků na stanici bude přesahovat dvě jednotky, což při tomto nastavení znamená, že vozíky budou ve většině případů nuceny čekat na naložení nebo vyložení.

## MATICE EXPERIMENTŮ

Tabulka 1 představuje matici experimentů, která definuje proměnné ovlivňující počet autonomních vozíků na trati a metodu řízení systému. Hodnota inkrementu je u obou proměnných nastavena na 1. Celkový počet experimentálních konfigurací dosahuje 64, přičemž každý scénář je simulován desetkrát pro zajištění statistického vyhodnocení výsledků.

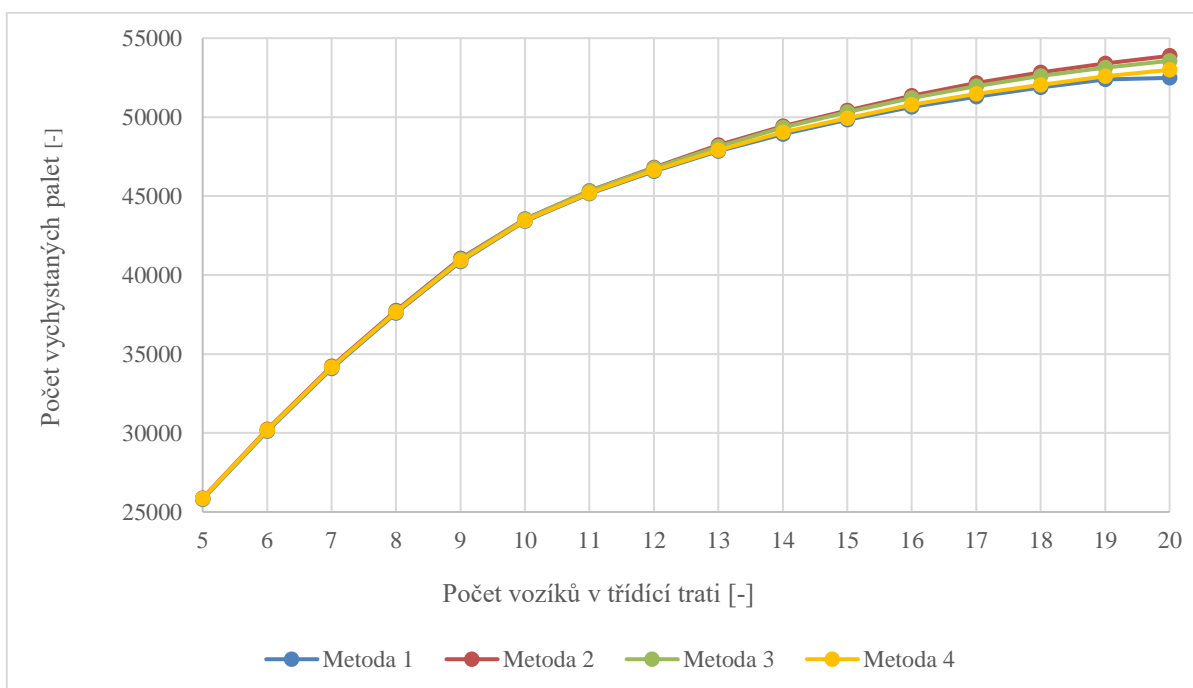
Tab. 1: Matice experimentů

Proměnné parametry	Číslo metody	Počet AGV
Minimální hranice	1	5
Maximální hranice	4	20
Inkrement	1	1

### 3.4 ANALÝZA A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

Tato kapitola se zabývá vyhodnocením získaných výsledků a jejich analýzou. Cílem je identifikovat případné závislosti mezi proměnnými použitými v experimentech a vyhodnotit jejich vliv na celkovou prostupnost systému. Výsledky analýzy mohou sloužit jako podklad pro návrh a optimalizaci řízení autonomních vozíků v reálných provozech.

Simulace byly provedeny v souladu s maticí experimentů, přičemž jejich podrobné výsledky jsou uvedeny v přílohách II, III, IV a V. Tyto přílohy obsahují tabulky s výsledky pro metody 1 až 4 a zahrnují především aritmetický průměr získaný z provedených simulací. Dále je uvedena směrodatná odchylka, která vyjadřuje proměnlivost jednotlivých simulací. Z dosažených hodnot vyplývá, že odchylky od aritmetického průměru byly minimální, to potvrzuje konzistentnost výsledků.



Graf 1: Výsledky experimentů metod 1 až 4

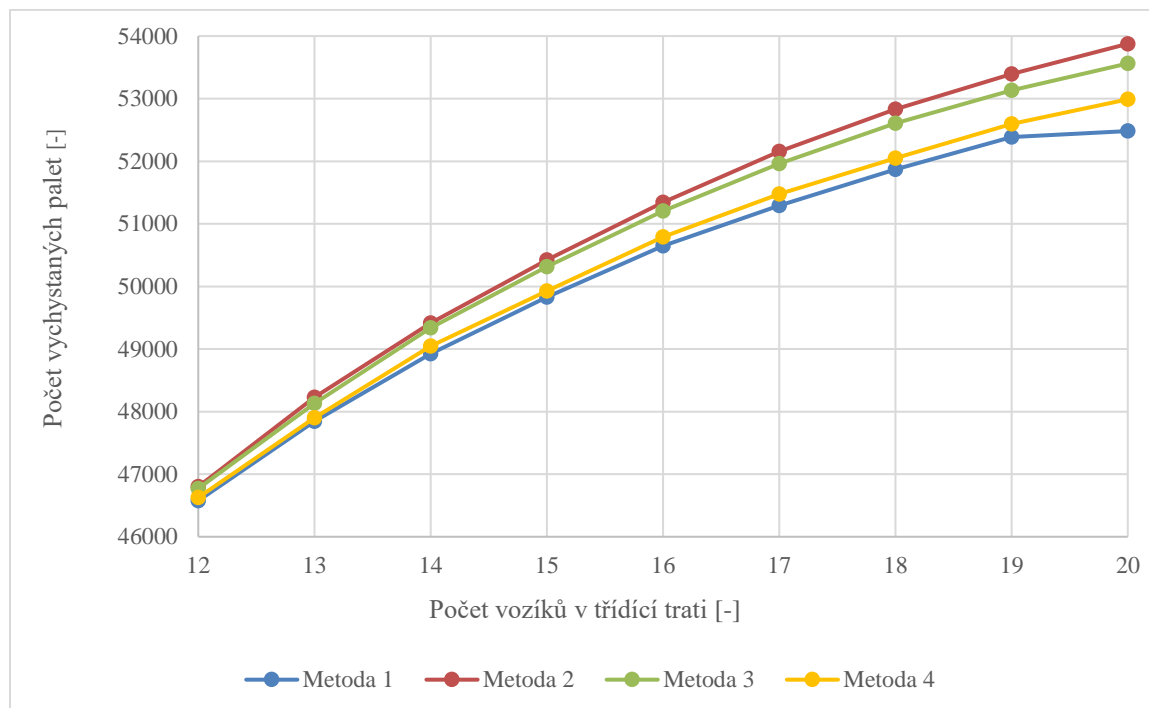
Data byla vynesena do grafu 1, v němž jsou jednotlivé metody barevně odlišeny. V levé části grafu lze pozorovat strmý růst průchodnosti systému, který se postupně zmírňuje se zvyšujícím se počtem vozíků. Do počtu 12 vozíků není patrný výrazný rozdíl mezi metodami 1 až 4, avšak při vyšších počtech dochází k mírnému nárůstu rozdílů mezi jednotlivými metodami.

Tab. 2: Výsledky experimentů podle matice experimentů

Počet AGV	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 4
5	25801	25880	25828	25859
6	30110	30223	30158	30182
7	34087	34223	34152	34163
8	37591	37747	37682	37656
9	40846	41047	40984	40915
10	43412	43554	43524	43449
11	45154	45331	45303	45187
12	46573	46803	46768	46627
13	47846	48229	48130	47899
14	48923	49416	49337	49045
15	49831	50424	50317	49925
16	50646	51345	51203	50789
17	51290	52158	51961	51478
18	51872	52831	52607	52048
19	52385	53393	53136	52596
20	52482	53877	53562	52989

Tabulka 2 obsahuje výsledné aritmetické průměry jednotlivých metod prezentované vedle sebe, což umožňuje jednoduché srovnání jejich velikostí. Zatímco v grafu není tento rozdíl zcela zřetelný, tabulková data jednoznačně ukazují, že metoda 1 vykazuje ve všech simulacích nejnižší hodnotu vychystaných palet a byla využita jako referenční základ pro hodnocení zlepšení efektivity průchodnosti systému. Na tomto základě byla vytvořena tabulka a graf procentuálního zlepšení efektivity oproti metodě 1, která je obsažena v příloze VI.

Dále byl vytvořen graf 2, který detailně zobrazuje část grafu 1 v intervalu od 12 do 20 vozíků. V této oblasti je již patrný rozdíl mezi jednotlivými metodami z hlediska počtu vychystaných palet, které systémem procházejí, a vliv řízení již nelze považovat za zanedbatelný. Výsledky jednoznačně ukazují, že nejefektivnější metodou je metoda 2. Jež při nízkém počtu vozíků dosahovala rozdílů v porovnání s metodou 1 v rozmezí desítek až stovek palet. Nicméně při experimentu s nejvyšším počtem vozíků je patrný výraznější růst rozdílu, který dosáhl hodnoty 1395 palet a tvoří navýšení efektivity o 2,66 %.



Graf 2: Detail výsledků experimentů metod 1 až 4

Na základě grafického zobrazení výsledků experimentů lze konstatovat, že preference řízení vozíků v logistickém toku v závislosti na naplnění autonomních vozidel (AGV) nemá při nižší hustotě zaplnění dráhy zásadní vliv na celkovou efektivitu systému. Pokud by se však jednalo o provoz autonomních vozíků s častými kolizemi trajektorií, tedy systémy s vyšší úrovní zahuštění, výsledky simulace naznačují, že efektivnější strategií řízení je preferování prázdných vozíků. Tyto vozíky neblokují pracovní stanice a mohou plynule pokračovat v jízdě, čímž se minimalizují prostoje a zvyšuje průchodnost systému.

Podle experimentálních výsledků lze doporučit implementaci této metody řízení při zavádění nových systémů s libovolným počtem AGV, a to i přes relativně nízké zvýšení efektivity o 0,31 %. V dlouhodobém horizontu může i taková optimalizace přispět k úspoře času a mírnému zvýšení ziskovosti provozu.

### 3.5 VALIDACE A VERIFIKACE

Verifikace je proces, jehož cílem je ověřit, zda byl konceptuální model správně a přesně převeden do simulační podoby. Nejedná se přímo o porovnání s reálným provozem, ale o kontrolu souladu modelu s návrhovým konceptem, logikou a předem stanovenými parametry. [26]

Tento proces probíhal průběžně během tvorby modelu, a to zejména z pohledu správného uspořádání layoutu a dodržení navržené struktury řízení. Logika řízení modelu byla kontrolována vizuálně během chodu simulace v reálném čase a byla kontrolována časová podobnost s procesy z reálného provozu. Dále pomocí funkce Breakpoint, která umožňuje pozastavení běhu simulace při spuštění konkrétních metod, a následně je možné krokovat jednotlivé řádky kódu a ověřovat správnost jejich fungování. Na základě těchto kroků lze potvrdit, že výsledný simulační model odpovídá návrhovému konceptu a je z hlediska verifikace považován za dostatečný.

Následně je nutné model validovat, což je způsob ověření toho, že je simulační model dostatečně přesný pro daný účel, dalo by se říct, že to je kontrola, zda model odpovídá skutečnosti a měl být vhodným nástrojem pro řešení aktuálního problému. V tomto případě je validace modelu řešena pomocí analytického výpočtu, jež výsledek je následně porovnán s výsledky experimentů simulačního modelu.

Tab. 4: Délky tras mezi jednotlivými stanicemi

	Trasa 1-1	Trasa 1-2	Trasa 1-3	Trasa 1-4
Délka trasy $l_{1i}$ [m]	6,57	10,87	15,17	19,47

Nejprve je nutné stanovit průměrnou délku dráhy jednoho okruhu AGV vozíku. Za tímto účelem byly změřeny jednotlivé vzdálenosti mezi nakládacími a vykládacími stanicemi, jak je uvedeno v tabulce 4. Z naměřených délek tras byl vypočítán aritmetický průměr, který byl vynásoben dvěma, aby byla určena délka okruhu včetně návratu k výchozí stanici.

$$l_c = \frac{\sum_{i=1}^4 l_{1i}}{4} \cdot 2 \quad (1)$$

$$l_c = \frac{6,57+10,87+15,17+19,47}{4} \cdot 2 = 26,04 \text{ m}$$

Tab. 5: Parametry pro validaci

Parametr	Proměnná	Hodnota	Jednotka
Rychlost AGV	$v_v$	1,5	[m · s <sup>-1</sup> ]
Zrychlení AGV	$a_v$	1	[m · s <sup>-2</sup> ]
Nabíjecí výkon AGV	$P_n$	10	[kW]
Spotřeba AGV při jízdě	$P_v$	1	[kW]
Čas nakládání AGV	$t_N$	6,5	[s]
Čas vykládání AGV	$t_V$	9	[s]
Doba simulace	$n_D$	30	[d]

Do tabulky 5 byly zahrnuty další parametry modelu nezbytné pro jeho validaci. Na základě vztahu (2) byla nejprve určena doba potřebná k dosažení maximální rychlosti vozidla AGV, která je shodná s dobou potřebnou pro jeho zpomalení na nulovou rychlost. Z této doby byla následně vypočtena dráha akcelerace ve vztahu (3).

$$t_1 = \frac{v_v}{a_v} \quad (2)$$

$$t_1 = \frac{1,5}{1} = 1,5 \text{ s}$$

$$l_1 = \frac{1}{2} \cdot a_v \cdot t_1^2 \quad (3)$$

$$l_1 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 1,5^2 = 1,125 \text{ m}$$

Od celkové délky okruhu je odečtena dráha, po kterou vozík zrychluje nebo zpomaluje, dle vztahu (4). Upravená délka je následně použita ve vztahu (5) pro výpočet celkové doby jízdy při konstantní provozní rychlosti. Na základě vypočtených časů je možné určit celkovou dobu jednoho pracovního cyklu, během něhož je vozík naložen, přesune se k výložní stanici, kde robotické rameno vyloží náklad, a následně se vrací zpět na nakládací stanici. Ve vztahu (6) jsou časy strávené na jednotlivých stanicích a doby přejezdů sečteny do průměrné doby jednoho cyklu.

$$l_2 = l_C - 4 \cdot l_1 \quad (4)$$

$$l_2 = 26,04 - 4 \cdot 1,125 = 21,54 \text{ m}$$

$$t_2 = \frac{l_2}{v_v} \quad (5)$$

$$t_2 = \frac{21,54}{1,5} = 14,36 \text{ s}$$

$$t_C = (4 \cdot t_1) + t_2 + t_N + t_V \quad (6)$$

$$t_C = (4 \cdot 1,5) + 14,36 + 6,5 + 9 = 35,86 \text{ s}$$

Doba simulace byla stanovena na 30 dní a ve vztahu (7) je tato doba převedena na sekundy. Pro určení doby, během níž je vozík funkční a v nabitém stavu, je nutné vypočítat koeficient nabití AGV. Tento koeficient je definován ve vztahu (8) jako poměr výkonu vozíku při nabíjení k jeho výkonu při provozu a v nabíjení. Ve vztahu (9) je tento koeficient následně použit k úpravě celkové doby simulace, čímž je stanovena doba, po kterou je AGV aktivně zapojeno do třídícího procesu.

$$t_S = 3600 \cdot 24 \cdot n_D \quad (7)$$

$$t_S = 3600 \cdot 24 \cdot 30 = 2\,592\,000 \text{ s}$$

$$\alpha_N = \frac{P_n}{P_n + P_v} \quad (8)$$

$$\alpha_N = \frac{10}{10+1} = 0,909$$

$$t_R = t_S \cdot \alpha_N \quad (9)$$

$$t_R = 2\,592\,000 \cdot 0,909 = 2\,356\,364 \text{ s}$$

Ve vztahu (10) je doba aktivního zapojení AGV vydělena dobou jednoho cyklu, čímž je získán teoretický počet zásilek přepravených jedním vozíkem během celé simulace. Vzhledem k tomu, že sledovaným parametrem v experimentech byl počet vydaných palet ze systému, je tento počet balíků dále dělen dvanácti (počet balíků na jedné paletě), čímž je získán počet vychystaných palet jedním vozíkem za dobu simulace (vztah (11)). Pro porovnání s výsledky simulace byl tento údaj následně vynásoben počtem vozíků zapojených do experimentu, což poskytuje teoretický počet vychystaných palet v závislosti na počtu nasazených AGV (vztah (12)).

$$n_{ZV} = \frac{t_R}{t_C} \quad (10)$$

$$n_{ZV} = \frac{2\,356\,364}{35,86} = 65\,708,1$$

$$n_{PV} = \frac{n_{ZV}}{12} \quad (11)$$

$$n_{PV} = \frac{71\,707,9}{12} = 5\,475,7$$

$$n_P = n_{PV} \cdot n_V \quad (12)$$

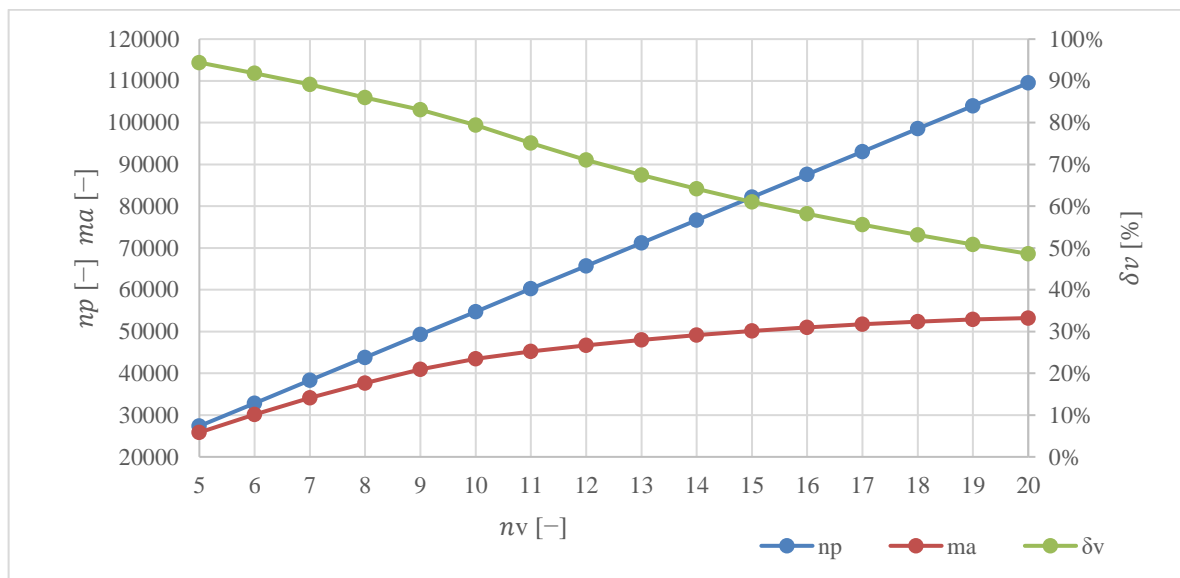
$$n_P = 5\,975,6 \cdot 5 = 27\,378,4$$

Kde:

$n_V$  [–] je počet vozíků v experimentu

Následně byl pro jednotlivé experimenty (s počtem vozíků od 5 do 20) vypočítán počet vychystaných palet, přičemž výsledky byly zaznamenány do tabulky v příloze VII. Dále byl z hodnot získaných metodami 1 až 4 spočten aritmetický průměr, který byl pro každý experiment rovněž uveden do stejné tabulky. Poslední sledovanou veličinou v této tabulce je porovnání výsledků simulace s analytickým výpočtem, přičemž je zde uvedena míra shody v procentech simulace k teoretické hodnotě získané analytickým přístupem.

Data uvedená v příloze VII byla přenesena do grafu 3, který umožňuje přehlednější vizuální porovnání mezi výsledky simulací a analytickým výpočtem. Z grafu je patrný lineární nárůst počtu vychystaných palet dle analytického výpočtu, zatímco výsledky simulací vykazují vysokou shodu při nižších počtech AGV, avšak s rostoucím počtem vozíků dochází k postupnému zvyšování odchylky.



Graf 3: Porovnání validace se simulací

Tato odchylka je vyjádřena pomocí křivky znázorňující procentuální shodu simulace s analytickým výpočtem. Zatímco při nižších hodnotách (např. při 5 AGV) dosahuje shoda až 94,4 %, při 20 vozících klesá pouze na 48,6 %.

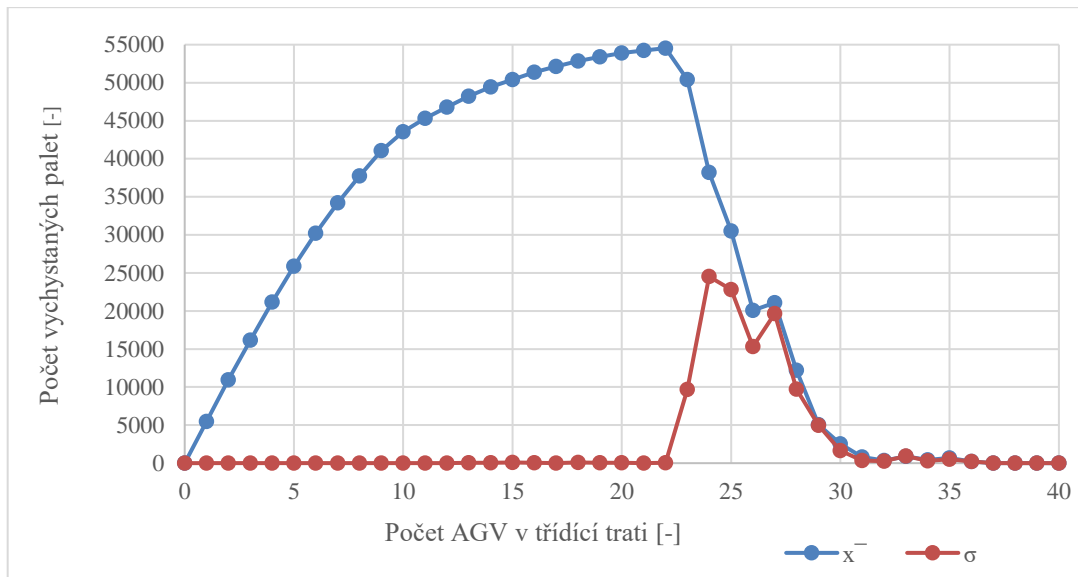
Tento pokles přesnosti je způsoben především skutečností, že analytický model vychází z ideálního průchodu AGV třídícím systémem bez zohlednění časových prodlev, které ve skutečnosti vznikají např. čekáním v křižovatkách nebo obsazením stanic jiným vozíkem.

Přesto je možné považovat provedenou validaci za dostatečnou, neboť výsledky analytického výpočtu odpovídají simulacím při nižších počtech AGV, kdy jsou provozní ztráty jsou méně vlivné. Výraznější rozdíly se objevují až při vyšším provozním zatížení systému.

### 3.6 ROZŠÍŘENÍ EXPERIMENTŮ

Pozitivní výsledky primárního testování simulačního modelu prokázaly rozdíly v efektivitě průchodnosti systému a potvrdily nevhodnější metodu. Jak však ukazuje graf 1, s rostoucím počtem vozíků průchodnost nadále stoupá. Tento trend nelze považovat za trvalý, neboť při určitém množství vozíků nevyhnutelně musí dojít k zahlcení třídící trati, buď úplným zaplněním, nebo zahuštěním, které blokuje logiku řízení předností.

Z tohoto důvodu je vytvořen nový experiment a interval počtu vozíků pro testování metody 2 je rozšířen na hodnoty od 1 do 40. Počet observací byl stanoven na 5 s cílem urychlit experiment při zachování dostatečné statistické významnosti.



Graf 4: Výsledky rozšířeného experimentu metody 2

Experimenty byly provedeny, jak bylo zadáno a podrobné výsledky jsou uvedeny v příloze VIII, ve stejném formátu jako u primárních testů. V této části analýzy je sledován nejen aritmetický průměr počtu vychystaných palet  $\bar{x}$ , ale i směrodatná odchylka  $\sigma$ , která odráží konzistenci jednotlivých observací.

Oba parametry jsou vyneseny v grafu 4, kde je přehledně patrný vývoj simulací. Stejně jako v primárním experimentu dochází zpočátku k výraznému nárůstu průchodnosti až do hodnoty 10 vozíků. Následně růst zpomaluje, avšak pokračuje až do 22 vozíků, kde systém dosahuje maximální průchodnosti. V tomto rozsahu zůstává směrodatná odchylka minimální, což potvrzuje vysokou stabilitu jednotlivých výsledků.

Při zvýšení počtu vozíků nad 22 dochází k poklesu průměrné průchodnosti a zároveň k nárůstu směrodatné odchylky. Jde tedy poznat, že v intervalu 23–30 vozíků dochází k částečnému zablokování třídící části systému v náhodném časovém okamžiku během simulace, což se projevuje výraznými rozdíly mezi výsledky jednotlivých observací.

Od 30 vozíků jde vidět poslední část ve které se směrodatná odchylka opět stabilizuje na nízké úrovni, zatímco aritmetický průměr výrazně klesl na nízkou úroveň. To naznačuje, že k zablokování dochází již v počáteční fázi simulace. V závěrečném experimentu s 40 vozíky jsou obě hodnoty nulové, což i přes méně výrazné znázornění v grafu potvrzuje úplné zablokování systému bez většího pohybu vozíků po jejich vpuštění na třídící trať.

## ZÁVĚR

Teoretická část práce se zaměřila na literární rešerši týkající se využití AGV (Automated Guided Vehicles) a AMR (Autonomous Mobile Robots) v Průmyslu 4.0. Byly analyzovány klíčové rozdíly mezi těmito dvěma typy vozíků, včetně jejich druhů navigací. Dále bylo provedeno základní rozdělení konstrukčních variant vozíků, které jsou vyrobeny v několika standardizovaných provedeních, ale i ve speciálních konstrukcích vyrobených na zakázku. Součástí rešerše byl také přehled předních evropských a globálních výrobců těchto technologií. Závěrem byly uvedeny aktuální trendy v oblasti automatizovaných třídících systémů.

Praktická část se věnovala návrhu koncepce a layoutu logistického bodu simulujícího překladiště bez dodatečných skladovacích prostor. Návrh vycházel z definovaných vstupních parametrů a poznatků z rešeršní části. Na základě těchto vstupů byl zvolen typ podjezdového AGV vozíku od společnosti Linde Material Handling a simulační model byl rozdělen do několika funkčních celků. Od příjmu zásilek a jejich manipulace pomocí robotických ramen, přes třídění prostřednictvím AGV vozíků, až po paletizaci a distribuci palet do výstupních nákladních vozidel. Poslední úsek zahrnuje válečkové dopravníky, které slouží jako krátkodobé akumulární místo před nakládkou.

Na vytvořeném modelu byla provedena série experimentů zaměřená na optimalizaci řízení třídící části. Testovány byly různé metody řízení při měnícím se počtu AGV vozíků (v rozmezí 5 až 20). Výsledky ukázaly, že nejvyšší průchodnosti systému je dosaženo při použití metody 2, která preferuje absolutní přednost prázdných AGV vozíků. Na základě těchto výsledků lze usuzovat, že tato metoda se může aplikovat jako předpoklad pro univerzální využití v různých typech nasazení, protože eliminuje neefektivní čekání na plné vozíky na jednotlivých pracovních stanicích.

Model je verifikován průběžnou kontrolou při tvorbě modelu a validován pomocí analytického výpočtu, kdy se početně zjišťovalo teoreticky možné množství přepravených zásilek. V případech s nízkým počtem AGV, kde nedocházelo k výrazným kolizím trajektorií AGV, byly výsledky simulace velmi blízké teoretickému výpočtu.

V závěru byl proveden rozšířený experiment pro Metodu 2, jelikož původní experimentace neodhalila maximální možnou kapacitu systému. Z toho důvodu je interval počtu AGV vozíků rozšířen na hodnoty od 1 do 40 a výsledky zjistili, že nejvyšší propustnost systému je dosažena při počtu 22 AGV.

Do budoucna se nabízí možnost rozšíření výzkumu o simulační modely pro různé aplikace AGV a AMR systémů, s cílem ověřit předpoklad univerzálnosti metody 2 nebo identifikovat efektivnější varianty řízení. Tyto poznatky by mohly dále zvýšit efektivitu aktuálních i nových aplikací v průmyslu.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] OYEKANLU, Emmanuel A.; SMITH, Alexander C.; THOMAS, Windsor P.; MULROY, Grethel; HITESH, Dave et al. A Review of Recent Advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and Research Areas for 5G-Based Smart Manufacturing Applications. Online. *IEEE access*. 2020, roč. 8, č. 1, s. 202312-202353. ISSN 2169-3536. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035729>.
- [2] *AMR vs AGV robot: jaký je rozdíl?* Online. In: PC MOBIL. 2023. Dostupné z: <https://www.pcmobil.cz/technologie-kolem-nas/amr-vs-agv-robot-jaky-je-rozdil>. [cit. 2024-11-01].
- [3] KAŠPÁREK, Jaroslav. 9. *Přednáška: Manipulační prostředky - M.H.E. dopravní prostředky*. PDF. 2023. [cit. 2024-10-29].
- [4] MOBILE INDUSTRIAL ROBOTS. *AGV vs. AMR – jaký je mezi nimi rozdíl?* Online. 2024. Dostupné z: <https://mobile-industrial-robots.com/cs/blog/agv-vs-amr>. [cit. 2024-11-01].
- [5] O'MEARA, Shane. *Finding the Right Fit for your Industrial Automation Need – AGVs or AMRs*. Online. In: <https://ez.analog.com/>. 2024. Dostupné z: <https://ez.analog.com/ez-blogs/b/engineerzone-spotlight/posts/finding-the-right-fit-for-your-industrial-automation-need---agvs-or-amrs>. [cit. 2024-10-29].
- [6] Lee, S., & Yang, H. (2012). Navigation of automated guided vehicles using magnet spot guidance method. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 28, 425-436. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2011.11.005>.
- [7] *Autonomní vozidla pro průmysl: jak se liší AGV od AMR*. Online. In: Automatizace.hw. 2022. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/autonomni-vozdila-pro-prumysl-jak-se-lisi-agv-od-amr.html>. [cit. 2024-11-01].
- [8] Yin, P., Li, W., & Duan, Y. (2018). Combinatorial inertial guidance system for an automated guided vehicle. *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2018.8361286>.
- [9] Fragapane, G., Koster, R., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *Eur. J. Oper. Res.*, 294, 405-426. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2021.01.019>.
- [10] *AGV – Automaticky řízené vozíky*. Online. In: Robotech. 2023. Dostupné z: <https://www.robotech.cz/post/agv-automaticky-%C5%99%C3%ADzen%C3%A9-voz%C3%ADky>. [cit. 2024-11-02].
- [11] *TOYOTA MATERIAL HANDLING*. Online. 2024. Dostupné z: <https://toyota-forklifts.cz/automatizovane-agv-voziky/>. [cit. 2024-11-01].
- [12] *Scott Automation a.s.* Online. 2024. Dostupné z: <https://scottautomation.com/cs-cz/products/agv>. [cit. 2024-11-02].
- [13] *Movexx AA1000-S*. Online. In: JKLogistika. 2024. Dostupné z: <https://www.jklas.cz/produkty/elektricke-tahace/movexx/aa1000-s/>. [cit. 2024-11-11].

- [14] *SERVIS CONTROL*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.serviscontrol.cz/#agv-family>. [cit. 2024-11-02].
- [15] *Asseco CEIT*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.asseco-ceit.com/en/>. [cit. 2024-11-02].
- [16] *Morello*. Online. In: *Morellogiovanni*. 2024. Dostupné z: <https://www.morellogiovanni.it/en/products/agv-automated-guided-carts/>. [cit. 2024-11-08].
- [17] *Linde Material Handling*. Online. 2024. Dostupné z: [https://www.linde-mh.cz/cs/Intralogistika/Roboticke-voziky-\(AGV\)/Prepravni-systemy-bez-ridice/](https://www.linde-mh.cz/cs/Intralogistika/Roboticke-voziky-(AGV)/Prepravni-systemy-bez-ridice/). [cit. 2024-11-03].
- [18] *SSI Schaefer*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.ssi-schaefer.com/cs-cz/produkty/dopravniky-doprava/agv>. [cit. 2024-11-12].
- [19] *Systémy logistiky*. Online. 2024, roč. 24, č. 213. 2024. Dostupné z: <https://www.systemylogistiky.cz/2024/10/14/sl-213-logistika-e-commerce-dorucovani-a-vydejni-boxy-digitalni-dvojce-v-logistice/>. [cit. 2025-02-02].
- [20] *Systémy logistiky*. Online. 2024, roč. 24, č. 214. 2024. Dostupné z: <https://www.systemylogistiky.cz/2024/12/10/sl-214-jak-se-meni-prace-lidi-ve-skladech-letecke-prepravy-5g-site-v-logistickyh-provozech/>. [cit. 2025-02-02].
- [21] *Optimalizujte efektivitu pomocí mobilních kobotů*. Online. 2024. Dostupné z: <https://mobile-industrial-robots.com/cs/blog/optimizing-efficiency-with-mobile-cobots-adding-mobility-to-collaborative-robot-arms-mir1200-pallet-jack-using-ai-to-revolutionize-pallet-handling-spolecnost-mir-ziskala-certifikaci-tuv>. [cit. 2025-02-02].
- [22] *Systémy logistiky*. Online. 2024, roč. 24, č. 212. 2024. Dostupné z: <https://www.systemylogistiky.cz/2024/08/20/sl-212-umela-inteligence-v-prumyslu-a-logistice-kubicke-skladovaci-systemy-lidske-zdroje-v-logistice/>. [cit. 2025-02-02].
- [23] *Autostore*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.autostoresystem.com/>. [cit. 2025-02-06].
- [24] Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45, 817–820. <https://doi.org/10.1177/2399808318796416>.
- [25] *The Power of Digital Twins in the Age of Industry 4.0 – Applications & Benefits*. Online. Dostupné z: <https://www.xavor.com/blog/the-power-of-digital-twins-in-the-age-of-industry/>. [cit. 2025-05-09].
- [26] ROBISON, Stewart. Simulation Verification, Validation and Confidence: A Tutorial. Online. *Trans Soc Comput Simul*. 1999, [https://www.researchgate.net/publication/234800615\\_Simulation\\_Verification\\_Validation\\_and\\_Confidence\\_A\\_Tutorial](https://www.researchgate.net/publication/234800615_Simulation_Verification_Validation_and_Confidence_A_Tutorial).

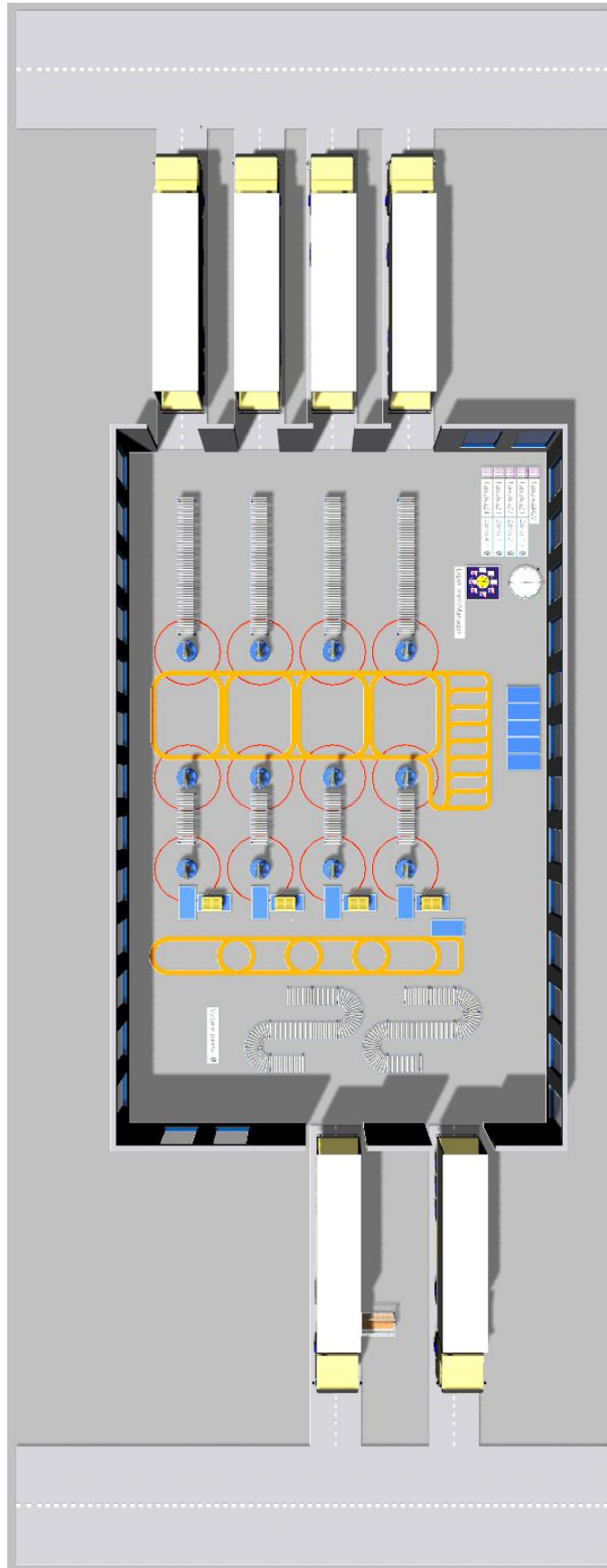
## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

5G	[–]	Fifth Generation
AGV	[–]	Automated Guided Vehicle
AMR	[–]	Autonomous Mobile Robot
CEIT	[–]	Central European Institute of Technology
ERP	[–]	Enterprise Resource Planning
RFID	[–]	Radio Frequency Identification
SSI	[–]	Schaefer Systems International
TMHE	[–]	Toyota Material Handling Europe
Wi-Fi	[–]	Wireless Fidelity
WMR	[–]	Warehouse Management Systém
$a_v$	$[m \cdot s^{-2}]$	Zrychlení AGV
$l_1$	[m]	Délka dráhy akcelerace
$l_{1i}$	[m]	Délka jednotlivých tras
$l_2$	[m]	Délka dráhy rovnoměrného pohybu
$l_C$	[m]	Průměrná délka cyklu AGV vozíku
$m_a$	[–]	Aritmetický průměr výsledků metod 1 až 4
$n_D$	[d]	Doba simulace
$n_P$	[–]	Počet vychystaných palet podle experimentu
$n_{PV}$	[–]	Počet vychystaných palet během simulace jedním AGV
$n_V$	[–]	Počet vozíků v experimentu
$n_{ZV}$	[–]	Počet zásilek přepraven jedním AGV během simulace
$P_n$	[W]	Nabíjecí výkon AGV
$P_v$	[W]	Spotřeba AGV při jízdě
$t_1$	[s]	Doba akcelerace AGV
$t_2$	[s]	Doba rovnoměrného pohybu AGV
$t_C$	[s]	Průměrná doba jednoho cyklu AGV
$t_N$	[s]	Doba nakládání AGV
$t_R$	[s]	Doba nabití AGV během simulace
$t_S$	[s]	Doba simulace
$t_V$	[s]	Doba vykládání AGV
$v_v$	$[m \cdot s^{-1}]$	Maximální rychlost AGV
$\bar{x}$	[ks]	Aritmetický průměr vychystaných palet
$\alpha_N$	[–]	Koeficient nabití AGV
$\delta_v$	[%]	Míra shody $m_a$ ku $n_P$ v procentech
$\sigma$	[ks]	Směrodatná odchylka vychystaných palet

## SEZNAM PŘÍLOH

- I Kompletní simulační model
- II Tabulka experimentálních výsledků metody 1
- III Tabulka experimentálních výsledků metody 2
- IV Tabulka experimentálních výsledků metody 3
- V Tabulka experimentálních výsledků metody 4
- VI Procentuální navýšení efektivity oproti metodě 1
- VII Porovnání vypočítané prostupnosti pro validaci s aritmetickým průměrem metod
- VIII Tabulka výsledků rozšíření experimentů metody 2

I Kompletní simulační model



## II Tabulka experimentálních výsledků metody 1

Hodnoty v tabulce reprezentují průchodnost systému v jednotkách kusů palet

Počet AGV	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Levá hranice intervalu	Pravá hranice intervalu
5	25801,4	7,6	25785,0	25812,0	25796,0	25806,8
6	30109,6	6,9	30096,0	30117,0	30104,6	30114,6
7	34087,1	10,1	34065,0	34098,0	34079,8	34094,4
8	37590,7	10,0	37576,0	37607,0	37583,5	37597,9
9	40845,6	12,3	40824,0	40868,0	40836,8	40854,4
10	43412,3	13,0	43380,0	43424,0	43403,0	43421,6
11	45154,1	23,3	45119,0	45184,0	45137,5	45170,7
12	46573,4	18,2	46537,0	46594,0	46560,4	46586,4
13	47845,6	23,2	47807,0	47877,0	47829,0	47862,2
14	48923,2	36,1	48872,0	48980,0	48897,4	48949,0
15	49830,9	44,1	49772,0	49896,0	49799,4	49862,4
16	50646,0	57,0	50530,0	50711,0	50605,3	50686,7
17	51289,7	44,0	51195,0	51329,0	51258,2	51321,2
18	51872,3	62,8	51747,0	51922,0	51827,4	51917,2
19	52384,8	70,1	52257,0	52480,0	52334,7	52434,9
20	52482,0	883,9	49972,0	52862,0	51849,7	53114,3

## III Tabulka experimentálních výsledků metody 2

Hodnoty v tabulce reprezentují průchodnost systému v jednotkách kusů palet

Počet AGV	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Levá hranice intervalu	Pravá hranice intervalu
5	25880,3	5,6	25872,0	25888,0	25876,3	25884,3
6	30223,1	6,5	30212,0	30235,0	30218,5	30227,7
7	34223,2	3,6	34216,0	34229,0	34220,7	34225,7
8	37746,8	11,7	37726,0	37768,0	37738,4	37755,2
9	41047,4	15,2	41028,0	41076,0	41036,6	41058,2
10	43554,0	14,2	43521,0	43568,0	43543,9	43564,1
11	45330,6	14,2	45316,0	45360,0	45320,4	45340,8
12	46803,3	20,1	46772,0	46831,0	46788,9	46817,7
13	48229,4	40,1	48172,0	48284,0	48200,7	48258,1
14	49415,9	25,8	49383,0	49465,0	49397,5	49434,3
15	50423,9	53,0	50355,0	50512,0	50386,0	50461,8
16	51344,6	52,5	51274,0	51413,0	51307,0	51382,2
17	52157,8	41,7	52108,0	52230,0	52128,0	52187,6
18	52831,4	69,0	52737,0	52965,0	52782,0	52880,8
19	53392,5	57,2	53338,0	53523,0	53351,6	53433,4
20	53876,8	55,1	53760,0	53952,0	53837,4	53916,2

## IV Tabulka experimentálních výsledků metody 3

Hodnoty v tabulce reprezentují průchodnost systému v jednotkách kusů palet

Počet AGV	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Levá hranice intervalu	Pravá hranice intervalu
5	25827,8	8,6	25815,0	25840,0	25821,6	25834,0
6	30157,7	6,1	30149,0	30169,0	30153,3	30162,1
7	34152,2	11,7	34136,0	34171,0	34143,9	34160,5
8	37682,4	9,4	37668,0	37699,0	37675,7	37689,1
9	40983,9	14,4	40951,0	41003,0	40973,6	40994,2
10	43523,9	16,8	43494,0	43548,0	43511,9	43535,9
11	45302,7	26,7	45263,0	45341,0	45283,6	45321,8
12	46768,2	23,9	46737,0	46812,0	46751,1	46785,3
13	48130,3	27,9	48086,0	48170,0	48110,4	48150,2
14	49336,6	29,7	49303,0	49400,0	49315,4	49357,8
15	50316,5	59,6	50198,0	50420,0	50273,9	50359,1
16	51203,1	45,4	51140,0	51275,0	51170,6	51235,6
17	51961,4	53,0	51860,0	52023,0	51923,5	51999,3
18	52606,5	26,2	52564,0	52664,0	52587,8	52625,2
19	53135,5	34,5	53077,0	53180,0	53110,8	53160,2
20	53562,0	64,9	53486,0	53689,0	53515,6	53608,4

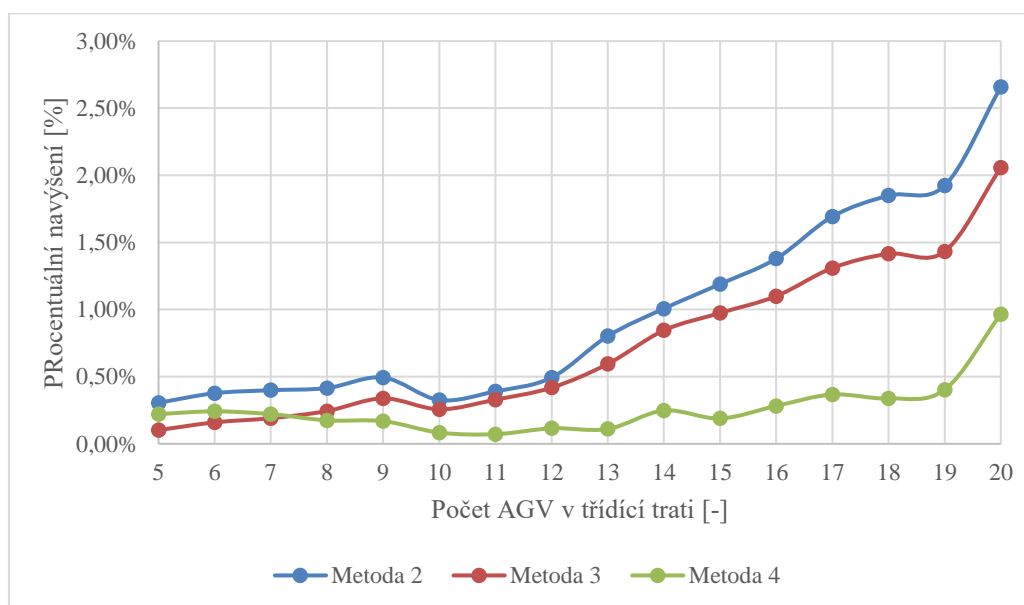
## V Tabulka experimentálních výsledků metody 4

Hodnoty v tabulce reprezentují průchodnost systému v jednotkách kusů palet

Počet AGV	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Levá hranice intervalu	Pravá hranice intervalu
5	25858,6	5,9	25852,0	25872,0	25854,3	25862,9
6	30182,4	7,3	30172,0	30197,0	30177,2	30187,6
7	34162,5	6,0	34153,0	34172,0	34158,2	34166,8
8	37656,3	11,0	37640,0	37670,0	37648,4	37664,2
9	40914,6	16,1	40884,0	40942,0	40903,1	40926,1
10	43448,6	13,4	43427,0	43467,0	43439,0	43458,2
11	45186,5	19,0	45153,0	45224,0	45172,9	45200,1
12	46627,2	17,0	46600,0	46661,0	46615,0	46639,4
13	47898,6	27,8	47862,0	47947,0	47878,7	47918,5
14	49044,5	26,2	49008,0	49100,0	49025,7	49063,3
15	49925,2	39,5	49872,0	50002,0	49896,9	49953,5
16	50788,9	32,1	50733,0	50832,0	50766,0	50811,8
17	51478,1	49,2	51394,0	51564,0	51442,9	51513,3
18	52047,6	73,9	51917,0	52142,0	51994,7	52100,5
19	52595,8	38,1	52530,0	52654,0	52568,6	52623,0
20	52989,1	54,9	52915,0	53073,0	52949,8	53028,4

## VI Procentuální navýšení efektivity oproti metodě 1

Počet AGV	Metoda 2	Metoda 3	Metoda 4
5	0,31 %	0,10 %	0,22 %
6	0,38 %	0,16 %	0,24 %
7	0,40 %	0,19 %	0,22 %
8	0,42 %	0,24 %	0,17 %
9	0,49 %	0,34 %	0,17 %
10	0,33 %	0,26 %	0,08 %
11	0,39 %	0,33 %	0,07 %
12	0,49 %	0,42 %	0,12 %
13	0,80 %	0,60 %	0,11 %
14	1,01 %	0,84 %	0,25 %
15	1,19 %	0,97 %	0,19 %
16	1,38 %	1,10 %	0,28 %
17	1,69 %	1,31 %	0,37 %
18	1,85 %	1,42 %	0,34 %
19	1,92 %	1,43 %	0,40 %
20	2,66 %	2,06 %	0,97 %



## VII Porovnání vypočítané prostupnosti pro validaci s aritmetickým průměrem metod

$n_V$ [-]	$n_p$ [-]	$m_a$ [-]	$\delta_v$ [%]
5	27378,4	25842,0	94,4 %
6	32854,1	30168,2	91,8 %
7	38329,7	34156,3	89,1 %
8	43805,4	37669,1	86,0 %
9	49281,1	40947,9	83,1 %
10	54756,8	43484,7	79,4 %
11	60232,5	45243,5	75,1 %
12	65708,1	46693,0	71,1 %
13	71183,8	48026,0	67,5 %
14	76659,5	49180,1	64,2 %
15	82135,2	50124,1	61,0 %
16	87610,9	50995,7	58,2 %
17	93086,5	51721,8	55,6 %
18	98562,2	52339,5	53,1 %
19	104037,9	52877,2	50,8 %
20	109513,6	53227,5	48,6 %

Kde:

$n_V$  [-] je počet vozíků v experimentu

$n_p$  [-] je počet vychystaných palet podle experimentu

$m_a$  [-] je aritmetický průměr výsledků metod 1 až 4

$\delta_v$  [%] je míra shody  $m_a$  ku  $n_V$  v procentech

## VIII Tabulka výsledků rozšíření experimentů metody 2

Hodnoty v tabulce reprezentují průchodnost systému v jednotkách kusů palet

Počet AGV	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Levá hranice intervalu	Pravá hranice intervalu
1	5496,0	3,5	5492,0	5500,0	5491,6	5500,4
2	10950,2	5,1	10944,0	10956,0	10943,8	10956,6
3	16175,2	4,4	16172,0	16180,0	16169,8	16180,6
4	21158,4	5,6	21152,0	21164,0	21151,5	21165,3
5	25880,6	6,8	25875,0	25888,0	25872,2	25880,6
6	30220,0	4,9	30212,0	30224,0	30213,9	30220,0
7	34222,8	3,9	34216,0	34226,0	34218,0	34222,8
8	37743,6	15,3	37726,0	37768,0	37724,7	37743,6
9	41052,6	16,6	41032,0	41076,0	41031,9	41052,6
10	43548,2	18,2	43521,0	43563,0	43525,7	43548,2
11	45325,8	13,1	45316,0	45348,0	45309,6	45325,8
12	46812,0	10,1	46804,0	46827,0	46799,4	46812,0
13	48226,0	52,6	48172,0	48284,0	48160,7	48226,0
14	49428,2	27,5	49397,0	49465,0	49394,0	49428,2
15	50425,0	76,2	50355,0	50512,0	50330,4	50425,0
16	51371,6	42,2	51324,0	51413,0	51319,2	51371,6
17	52143,8	25,7	52121,0	52179,0	52111,9	52143,8
18	52848,6	81,0	52737,0	52965,0	52748,0	52848,6
19	53415,6	62,7	53362,0	53523,0	53337,8	53415,6
20	53902,8	48,9	53822,0	53952,0	53842,1	53902,8
21	54223,8	26,9	54193,0	54253,0	54190,4	54223,8
22	54537,6	40,0	54479,0	54582,0	54487,9	54537,6
23	50425,2	9694,2	33084,0	54827,0	38388,3	50425,2
24	38222,8	24517,4	372,0	54858,0	7780,4	38222,8
25	30514,0	22825,5	9340,0	54888,0	2172,4	30514,0
26	20078,0	15340,0	6556,0	44998,0	1030,9	20078,0
27	21095,4	19659,6	6701,0	54576,0	-3315,2	21095,4
28	12190,4	9726,8	4604,0	29212,0	113,0	12190,4
29	5045,2	4950,8	548,0	11524,0	-1102,0	5045,2
30	2522,8	1633,1	925,0	5204,0	495,1	2522,8
31	787,4	350,8	400,0	1304,0	351,8	787,4
32	342,4	241,2	87,0	616,0	42,9	342,4
33	904,2	929,4	88,0	2504,0	-249,8	904,2
34	420,8	314,2	87,0	765,0	30,6	420,8
35	679,2	514,0	0,0	1434,0	41,0	679,2
36	200,2	233,0	0,0	516,0	-89,2	200,2
37	17,6	15,6	0,0	36,0	-1,8	17,6
38	2,2	3,3	0,0	8,0	-2,0	2,2
39	0,8	1,8	0,0	4,0	-1,4	0,8
40	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0