



# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní  
Ústav letecké dopravy

Simulační model řízení letového provozu v procesu pojíždění  
letadel na LKPR

Simulation Model of the ATC During Aircraft Taxiing at LKPR

Diplomová práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravních spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: Ing. Slobodan Stojić, Ph.D.

Ing. Petr Had

**Bc. Petra Mihálová**

---

Praha 2023

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
Fakulta dopravní  
děkan  
Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K621.....Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE** (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Petra Mihálová**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy**

Název tématu (česky): **Simulační model řízení letového provozu v procesu  
pojízďení letadel na LKPR**

Název tématu (anglicky): Simulation Model of the ATC During Aircraft Taxiing  
at LKPR

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je vytvořit simulační model řízení letového provozu v rámci procesu pojízďení letadla na Letišti Václava Havla Praha.
- Provedte analýzu současných procedur řízení letového provozu na letišti.
- Stanovte základní prvky modelu a definujte provozní scénáře.
- Provedte výběr simulačního nástroje a vytvořte model.
- Provedte integraci vyvinutého modelu s existující platformou pro simulaci pojízďení letadel.
- Ohodnotte možnost použití vyvinutého nástroje v rámci tvorby bezpečnostních studií.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Wolfgang Kuhn, Handbook of digital enterprise systems: digital twins, simulation and AI, 2019  
Fei Tao, et al, Digital Twin Driven Smart Design, Academic Press 2020  
Procedures for Air Navigation Services (PANS) - Air Traffic Management (Doc 4444)

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Slobodan Stojić, Ph.D.**  
**Ing. Petr Had**

Datum zadání diplomové práce: **16. července 2021**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2023**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu letecké dopravy



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Petra Mihálová  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 16. května 2023

## Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na zpracování nadstavby již existujícího modelu pro znázornění dopravy na letišti. Největší pozornost je upřena na tvorbu rozhodovacího procesu modelu, který odpovídá v reálném prostředí funkci a interakci řídicího letového provozu.

Vlastní přínos spočívá v rozvinutí existujícího modelu o vybrané procesy s integrací řídicího letového provozu a zajištění hladkého provozu se zaměřením na pojezdový systém. Úkolem modelu je samostatné pojíždění letadel pomocí navolených páteřních tras s určitými obměnami. Při každé nutnosti zastavení letadla, nebo výskytu jakéhokoliv problému na dané trase se algoritmus přepočítává pomocí předvolených kritérií s dotazem na řídicího v letovém provozu, který je v modelu zhotoven pomocí několika agentů. Tento model je vyvinut na bázi multiagentního modelování, tedy využití komunikace mezi agenty v rámci daného prostředí letiště.

V práci jsou analyzovány dosavadní studie zabývající se obdobnou problematikou. Dále je představena současná situace řízení letového provozu na letišti, kde jsou zmíněna jednotlivá stanoviště, jejich přidružené pracoviště a jejich úkoly, ze kterých byly vybrány procesy pro pozdější simulaci. V praktické části je popsán model, na kterém jsou představeny jednotlivé procesy v rámci pojíždění na letišti s řešením případných kolizních situací se zásahem řídicího v letovém provozu. Na základě vytvořeného modelu je provedeno porovnání stávajícího modelu s již existujícím a je zohledněna možnost zakomponování nadstavby složky řízení letového provozu vyvinutého modelu. Dále je uskutečněna diskuze vyvinutého modelu v rámci rozšíření do modelu s infrastrukturou Letiště Václava Havla v Praze. Závěrem je na základě vyhodnocených dat provedeno posouzení vyvinutého modelu v rámci bezpečnostních studií.

Klíčová slova: ATC, pohybové plochy, simulace, AnyLogic, Letiště Václava Havla, simulační model

## Abstract

This thesis is focused on creating an advanced version of previous model describing airport related traffic. The main focus is on the decision making algorithm, which represent the function and interaction of the air traffic control in the real environment.

Main contribution is by extending the existing model with chosen processes including air traffic control integration and by ensuring smooth traffic oriented on taxiways. The goal of the model is an independent airplane taxiing through determined main routes with possible modifications. During each stop or each obstacle on given route the algorithm recalculates with regards to predetermined set of criteria while communicating with the air traffic control, which is in the current model represented by a given number of agents. The model itself is then developed on the basis of multiagent modeling, which employs a specific amount of agents in given environment who communicate with each other.

A part of the thesis is an analysis of the available work regarding similar models. The current state of the art of the air traffic control is presented, including the description of each constituent stations, affiliated departments and their function, few of which were then selected to be included in the simulation. The presented model is then described in the experimental part of the thesis, demonstrating individual tasks during airplane taxiing on the airport and the process of resolving possible collision events through air traffic control interventions. Expanding from the developed model, a comparison between the previous and the current model is made and the possibility of implementation of the presented advanced version of the air traffic control is considered. . Discussed is then the option of integration of the presented model with the current infrastructure at the Letiště Václava Havla v Praze. On the basis of the acquired data, the presented model is then compared with selected studies regarding the safety analysis of the airport traffic.

Keywords: ATC, taxiways, simulation, AnyLogic, Vaclav Havel Airports, simulation model

## Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat všem, kteří mi pomohli při psaní této diplomové práce. Zvláště děkuji svým vedoucím diplomové práce, kterými byli pan Ing. Slobodan Stojić, Ph.D. a Ing. Petr Had za odborné vedení a rady v průběhu zpracování diplomové práce. Obrovské poděkování patří laboratoři LAMbDA, konkrétně Ing. Janě Kuklové Ph.D. za její obrovskou ochotu a pomoc při vyhotovení simulačního modelu. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Jiřímu Šálovi za odborné konzultace a umožnění přístupu k mnoha důležitým informacím. Veliké poděkování patří také mému příteli, mým rodičům a dalším blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia. Velice si veškeré podpory vážím.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Simulační model řízení letového provozu v procesu pojiždění letadel na LKPR vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 28. srpna 2023

.....  
*Prohlašuji*  
.....

## Obsah

1	Analýza současných systémů a procedur řízení letového provozu na LKPR .....	18
1.1	Zhodnocení současné literatury .....	19
1.2	Řízení letového provozu.....	21
1.2.1	Povinnosti Watch Supervisor/Senior Controller (WS/SC) TWR .....	24
1.2.2	Povinnosti Planning Controller/Executive Controller (PC/EC) a pracovního místa Delivery (CDD).....	25
1.2.3	Povinnosti pracovního místa Tower Executive Controller (TEC).....	25
1.2.4	Povinnosti pracovního místa Tower Planning Controller (TPC).....	25
1.2.5	Povinnosti pracovního místa Ground Executive Controller (GEC).....	26
1.2.6	Povinnosti pracoviště Delivery (CDD) .....	27
1.2.7	Povinnosti instruktora (OJTI).....	27
2.	Popis procesů na LKPR.....	28
2.1	Start-up .....	29
2.2	Push-back .....	29
2.3	Taxiing .....	30
2.4	Příjezd na holding point .....	32
2.5	Odmrazování letadel na LKPR .....	33
2.6	Vybrané provozní procesy .....	33
3	Modelování systémů a volba vhodného prostředí pro simulaci .....	35
3.1	Simulačního prostředí - Anylogic .....	35
3.1.1	Multiagentní modelování .....	36
3.1.2	Předchozí verze modelu .....	36
3.2	Koncepce současného modelu .....	37
3.2.1	Grafická část modelu.....	37
3.2.2	Logická část modelu.....	39
3.3	Fungování a princip nově vyvinutého modelu .....	40



3.3.1	Popis modelu .....	41
3.4	Bloky .....	47
3.4.1	Source .....	47
3.4.2	MoveTo .....	48
3.4.3	SelectOutPut .....	49
3.4.4	TrainEnter .....	49
3.4.5	Delay .....	49
3.4.6	Dispose .....	50
3.4	Agenti a populace agentů .....	50
3.5.1	Main .....	51
3.5.2	Aircraft .....	51
3.5.3	Animation .....	51
3.5.4	ApronControl .....	52
3.5.5	CrossingControl .....	52
3.5.6	SegmentControl .....	53
3.5.7	VirtualQueueElement .....	54
3.6	Provozní procesy .....	54
3.6.1	První proces – změna směru poježdění .....	54
3.6.2	Druhý proces – obousměrné, konfliktní segmenty .....	55
	Podrobné výsledky jsou zpracovány v kapitole 3.7. ....	55
3.6.3	Třetí proces – křižovatky .....	55
3.6.4	Čtvrtý proces – zálivy .....	56
3.7	Výstupní hodnoty .....	57
3.8	Implementace modelu v kontextu infrastruktury Letiště v Praze .....	64
4	Sjednocení a porovnání modelu s již existující platformou .....	66
4.1	Rozdílnost složky ATC v předcházejícím a nově vyvinutém modelu .....	66

4.2	Co nově navržený model neřeší .....	68
5	Diskuze.....	69
5.1	Implementace řešení v rámci modelu infrastruktury Letiště Václava Havla .....	69
5.1.1	Celkový průjezd infrastrukturou .....	69
5.2	Shrnutí implementace agentů do infrastruktury LKPR.....	81
5.3	Možnosti využití modelu v rámci tvorby bezpečnostních studií.....	82
5.3.1	Bezpečnostní analýza .....	84
5.3.2	Scénáře nově vyvinutého modelu pro možnost tvorby bezpečnostních studií.....	85
6	Závěr.....	89
	Seznam použité literatury .....	91

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1 – Rozdělení a řízení vzdušného prostoru [12] (upraveno autorem).....	22
Obrázek 2.1 – Jednotlivé procesy v rámci pojiždění na letišti a k nim příslušná povolení ...	288
Obrázek 3.1 – Převzatá grafická část existujícího modelu [] <b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
Obrázek 3.2 – Grafická část modelu ze simulačního prostředí AnyLogic.....	39
Obrázek 3.3 – Stavový diagram obecných procesů .....	390
Obrázek 3.4 – Algoritmus postupu letadla v modelu .....	422
Obrázek 3.5 – Vytyčení možných vstupů a výstupů, které se generují náhodně.....	48
Obrázek 3.6 - Rozkreslené možnosti kombinací scénářů .....	58
Obrázek 3.7 – Graf – Histogram průměrných časů zdržení v zálivu se zvyšující se intenzitou .....	59
Obrázek 3.8 – Graf – Histogram průměrných časů průjezdu letadla infrastrukturou .....	611
Obrázek 3.9 – Graf – Histogram průměrných časů přilétajících letadel .....	622
Obrázek 3.10 – Graf – Histogram průměrných časů odlétajících letadel jedoucích na vyčkávací místo RWY .....	633
Obrázek 4.1 – Stavový diagram ATC pro potencionální udávání přednosti v křižovatkách.	711
Obrázek 4.2 – Nastínění situace s prioritizací v křižovatkách (upraveno autorem) [13].....	7272
Obrázek 4.3 – Křižovatka Bravo, Hotel, Bravo1 a Zulu [13] .....	733
Obrázek 4.4 – Křižovatka Foxtrot, Lima, Hotel [13].....	744
Obrázek 4.5 – Identifikované kratší obousměrné úseky na letišti Václava Havla v Praze (upraveno autorem) [13].....	755
Obrázek 4.6 – Identifikace delších obousměrných segmentů na letišti Václava Havla v Praze [13] .....	76
Obrázek 4.7 – Model řešení při vytlačení ze stání a současně dojezd na stání .....	79
Obrázek 4.8 – Komplikovaný záliv u pojezdové dráhy Juliet [13].....	80
Obrázek 4.9 – Nový záliv Hotel1 [13] .....	8181

Obrázek 5.1 – Vizualizace uzavření stání ..... 87

## Seznam tabulek

Tabulka 2.1 - Jednotlivé TWY a omezení na maximální rozpětí letadla [4] ..... 322

Tabulka 3.1 – Průměrný čas zdržení v zálivu ..... 58

Tabulka 3.2 - Průměrný čas průjezdu letadla infrastrukturou ..... 59

Tabulka 3.3 - Průměrný čas průjezdu letadla infrastrukturou ve směru přilétajících letadel... 61

Tabulka 3.4 - Průměrný čas průjezdu letadla infrastrukturou ze stání směřující k odletu ..... 622

Tabulka 3.5 – Průměrný počet udělených povolení na letadlo ..... 643

Tabulka 4.1 - Zobrazení dávání přednosti v zálivu při vytlačení a současně zajetí letadla na stání ..... 80

## Seznam symbolů a použitých zkratek

Zkratka	Význam	Český překlad
ABM	Agent-Based Modeling	Multiagentní modelování
ACC	Area Control Zone	Oblastní středisko řízení
AD	Aerodrome	Letiště
ADES	Aerodrome of Destination	Letiště určení
AOBT	Actual Off-Block Time	
AoR	Area of Responsibility	Oblast odpovědnosti
APIS-R	Visual Docking Guidance System	-
APP	Approach Control Service	Přibližovací služba řízení
ARO	Aerodrome Reporting Officer	Ohlašovna letových provozních služeb
A-SMGCS	Advanced surface movement guidance and control system	System sledování a řízení provozu na provozních plochách
ATA	Actual Time of Arrival	Skutečný čas příjezdu
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
ATCO	Air Traffic Control Officer	Řídící letového provozu
ATIS	Automated Terminal Information Service	Automatická informační služba koncové řízené oblasti
ATM	Air Traffic Management	Management toku letového provozu
ATS	Air Traffic Service	Letové provozní služby
CDD	Clearance Delivery Dispatcher	Pracoviště Delivery/pracovní místo Delivery
CDP	Central Data Processing	Organizační jednotka Centrální dispečink provozu terminálů
CTOT	Calculated Take-Off Time	Předpokládaný čas vzletu
CTR	Control Zone	Řízený okrsek
DEL	Delivery	-
EC	Executive Controller	-
EOBT	Estimated Off Blocks Time	Předpokládaný čas zahájení pojíždění

FPL	Flight Plan	Letový plán
GEC	Ground Executive Controller	Pracovní místo Ground
GND	Ground	-
GPU	Ground Power Unit	Pozemní energetická jednotka
Hod.	-	Hodina
ICAO	International Civil Aviation Organisation	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Instrument Flight Rules	Pravidla pro let podle přístrojů
LKPR	Prague Airport	Letiště Praha
LVP	Low Visibility Procedures	Postupy za nízké dohlednosti
MMP	-	Mobilní mechanizační prostředek
MVM	-	Mezilehlé vyčkávací místo
NOTAM	Notice to Airmen	Oznámení o zřízení, stavu nebo změně kteréhokoli leteckého zařízení
OJTI	On-The-Job Training Instructor	Instruktor
OP	-	Odbavovací plocha
PC	Planning Controller	-
PEC	Planning Executive Controller	-
PRG	Prague	Praha
QFU	Magnetic Heading of a Runway	Magnetický směr RWY
QNH	Pressure at the Mean Sea Level	Atmosférický tlak redukováný na střední hladinu moře
REA	Ready Message	-
RWY	Runway	Dráha
SC	Senior Controller	Vedoucí směny bez možnosti řízení
SID	Standard Instrument Departure	Standardní přístrojový odlet
SMC	Surface movement control	Řízení pohybů na pohybové ploše
SMS	Safety Management system	System řízení bezpečnosti
SRM	Safety Risk Management	Řízení bezpečnostních rizik

TEC	Tower Executive Controller	Pracovní místo Tower
TMA	Terminal Control Area	Koncová řízená oblast
TPC	Tower Planning Controller	Pracovní místo Tower
TOBT	Target Off-Block Time	Cílový čas ukončení pozemního odbavení letadla
TSAT	Target Start-up Approval Time	Cílový čas vydání povolení ke spouštění motorů
TWR	Tower	Letištní řídicí věž nebo letištní řízení
TWY	Taxiway	Pojížděcí dráha
VDGS	Visual Docking Guidance System	-
VFR	Visual flight rules	Pravidla pro let za viditelnosti
WS	Watch Supervisor	Vedoucí směny

# Úvod

Každé letiště má pro potřeby koordinace a zajištění co nejbezpečnější funkčnosti letového provozu zřízenou službu řízení letového provozu (ATC). Řízení letového provozu má v leteckém průmyslu prvořadý význam pro zajištění bezpečného, uspořádaného a efektivního pohybu letadel ve vzdušném prostoru a na letištích. Poskytuje vedení a nezbytný dohled k prevenci nehod, řízení toku provozu a reakci na různé výzvy, které mohou během letu nastat. Bez účinného ATC by letecký průmysl čelil značným rizikům a provozním problémům, které by mohly ohrozit bezpečnost a narušit leteckou dopravu.

V rámci zkoumání podstatných situací a jejich dopadu na provoz letecké dopravy se využívá modelování, které dokáže věrohodně znázornit a rozpracovat danou situaci, aniž by k ní došlo. Pro tyto potřeby nejsou nutná data z reálného prostředí, ale stačí fiktivní data. Pro letectví je využití modelování určitých scénářů výhodné k zjištění a předcházení potenciálního rizika a nebezpečí. Pomocí simulace dochází k vytváření digitální reprezentace reálného procesu za účelem pochopení jeho chování, vytváření předpovědí a testování změn bez dopadu na skutečný systém. Modelování konkrétních scénářů zahrnuje vytváření a analyzování různých procesů v simulačním prostředí. Každý scénář představuje specifickou sadu podmínek, událostí nebo rozhodnutí, které mohou ovlivnit modelovaný systém.

Modelování scénářů v letištním systému řízení pozemního provozu zahrnuje použití simulačních technik k vytvoření modelů, které napodobují operace a procesy řízení pozemního provozu na letišti. V systému jsou kontroly a rozhodování soustředěny na jednom místě, což umožňuje efektivní koordinaci a řízení činností po celé ploše letiště. Tento typ modelování je velmi důležitý v leteckém průmyslu, protože pomáhá optimalizovat provoz, zlepšit efektivitu a zajistit zvýšení bezpečnosti.

V souhrnu lze konstatovat, že dopad řízení letového provozu v České republice je dalekosáhlý, zahrnuje bezpečnost, ekonomickou prosperitu, konektivitu a celkové fungování leteckého průmyslu. Dobře řízený systém řízení letového provozu přispívá k bezpečnému a efektivnímu vzdušnému prostoru, z něhož mají prospěch jak občané země, tak širší mezinárodní letecká komunita.



Cíl této práce je kladen na tvorbu simulačního modelu řízení letového provozu v rámci procesu pojíždění letadel a procesů s ním blízce spojených na Letišti Václava Havla v Praze a posouzení nástroje v rámci tvorby bezpečnostních studií. Tato práce navazuje na již vytvořený model Ing. Hada. Práce analyzuje soudobé studie a jejich stav v rámci současných procedur řízení letového provozu na letišti. Následně jsou v práci rozpracovány jednotlivé povinnosti služeb řízení letového provozu, kde se postupně vybírají konkrétní procesy a vhodný přístup modelování pro následnou simulaci. Na základě vybraných procesů v kompetenci řízení letového provozu bylo nutné vytvořit model, který disponuje částí grafickou a částí logickou pro přiblížení dané problematiky. Dále bylo nutné vyhotovený model porovnat s již existujícím modelem a zhodnotit přínos a případnou integraci do stávajícího modelu. V rámci diskuze bylo zhodnoceno rozšíření stávajícího modelu a algoritmu pro případný model s infrastrukturou Letiště Václava Havla v Praze v souvislosti s reálným provozem. V poslední kapitole práce byla na základě obdržených dat z vytvořené simulace posouzena možnost využití modelu v rámci bezpečnostních studií.

# 1 Analýza současných systémů a procedur řízení letového provozu na LKPR

Teoretické zázemí této práce popisuje obsah informací ohledně chodu provozu se složkou ATC. Nejprve je představena problematika role řízení letového provozu v rámci procesů na letišti, kdy role řídicího je nedílnou součástí chodu a fungování letiště. Obdobnou analýzou se již několik studií zabývalo a jejich výsledné analýzy jsou přiblíženy v následující kapitole. Dále jsou důkladně rozpracovány procesy řešené v kompetenci řídicích letového provozu na letišti Václava Havla v Praze. Jaké úkony mají jednotlivé stanoviště na starosti a co je účelem jejich každodenní práce.

Letiště Václava Havla v Praze je největším veřejným mezinárodním civilním a plně koordinovaným letištem na území České republiky, které je situované na severozápadním okraji Prahy, přibližně 17 km od centra hlavního města. Mezinárodní organizací pro civilní letectví (ICAO) je letiště označováno zkratkou LKPR a dle mezinárodní asociace leteckých dopravců je značeno zkratkou PRG. Letiště nese kódové označení 4E a umožňuje provoz letadel kategorie E, což jsou letadla s rozpětím křídel do 65 metrů a zároveň umí odbavovat i větší letadla – tzv. kritické typy letadel u kterých platí určitá omezení. Celková rozloha letiště je vydána 9 200 000 m<sup>2</sup>. Nadmořská výška letiště činí 1234 ft/ 376 m a pro účely požární a záchranné služby nese označení CAT 10. [1]

Ročně toto mezinárodní letiště před pandemií odbavilo přibližně 15 milionů cestujících, momentálně se letiště z pandemie stále vzpamatovává, nicméně za rok 2022 letiště odbavilo něco málo přes 10 milionů cestujících, mimo jiné díky silné letní sezoně, ačkoliv v porovnání s rokem 2019 tomu bylo stále o třetinu méně. Za rok 2022 bylo ve vzdušném prostoru České republiky zaznamenáno 550 194 pohybů (vyjma letů v nižších hladinách), za leden roku 2023 jich bylo 34 888, což je o 20 % více než předešlý rok ve stejném časovém období, stejný trend je pak očekáván i v dalších měsících. V rámci zimního letového řádu, tedy od 30. října do 25. března, letiště odbavilo přes 4 milióny cestujících. V roce 2022 bylo v nabídce k dispozici přes 50 leteckých společností, které nabízeli přímou linkou spojení do více než 130 destinací po celém světě, v zimě 2023 byla tato nabídka rozšířena o další nová letecká spojení. [1]

## 1.1 Zhodnocení současné literatury

Dosavadní studie, věnující se problematice simulování řízení letového provozu v procesu pojíždění na letišti, případně obdobné tématicce, byly podrobeny důkladné analýze. Bylo ověřeno, že žádný totožný výzkum nebyl dosud proveden.

### Související práce

První článek s názvem “Scenario Modeling in a Centralized Airport Ground Traffic Control System“ ke své analýze využívá aplikaci simulačního programu GTSS. Pomocí programu testuje algoritmy zaměřené na konkrétní scénáře na letišti, ve kterých je centralizované řízení nezbytné. Program GTSS umožňuje experimentaci s modelem dopravní sítě letiště a umožňuje uživateli popsat scénáře a studovat výsledky kontrolních rozhodnutí pomocí vizuálních informací. Výsledné animace pohybových procesů umožňuje znázornit ve 2D prostoru a poskytuje široké spektrum dat. [2]

Hlavním cílem této studie je automatizovaný systém centralizovaného řízení procesů na letištích, kdy jeho hlavní funkcí je obecné sledování dopravy. Studie si neklade za cíl simulovat dlouhodobé procesy na letištích z důvodu nízké využitelnosti a nevyřešené problematiky z hlediska rozpoznávání takových situací. [2]

Druhý článek “Digital Twin as a Decision Support Tool for Airport Traffic Control“ pojednává o simulačním modelu, který je v rámci experimentů s digitálním dvojčetem využíván jako testovací prostředí v oblasti centralizovaného řízení provozu na letištích. V rámci modelu by měly být popsány a reprodukovány scénáře s nutností zapojení centralizovaného řídicího systému. Z počátku je zamýšleno, že by role řídicího byla prováděna samotným uživatelem. [3]

Provedený výzkum dokázal propojit simulaci digitálního dvojčete s fyzickým objektem. Digitální dvojče dle výzkumu může být aplikované jako univerzální informační základna pro rozvoj a testování různých řešení v oblasti centralizovaného řízení pozemní dopravy na letištích. Poslední část výzkumu ukázala, že nejslibnější směry pro další výzkum jsou spojeny s aplikacemi strojového učení. [3]

Třetí studie s názvem “Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Mix-mode Runway Sequencing” diskutuje o vzletech a přistáních na totožné dráze s úvahou zvýšení propustnosti dráhy se zachováním bezpečnostních rozstupů. Tento koncept provozu je mnohem náročnější než provoz v segregovaném režimu. Proto byl navržen multiagentní přístup k výcviku dvou agentů, kde jeden by se zcela specifikoval na odlétající letadla a druhý na přilétající letadla. Agent pro odlety by měl na starosti odlety a agent pro přílety by se staral o rozhodnutí o časech zpoždění, nebo rozestupu letadel. Agenti jsou vyškoleni pomocí algoritmu MADDPG v prostředí simulace s reálnými daty od A-SMGCS. [4]

Výsledek ukazuje vynikající výkon trénovaných modelů v porovnání s modelem ad-hoc, kdy navrhovaný model zvyšuje propustnost dráhy. Dále bude nutné provést další experimenty pro lepší pochopení zpoždění a propustností dráhy. Kromě toho by měly být provedeny experimenty s ATCO na vyvinutém simulátoru dráhy, aby se vyhodnotil potenciál výhod navrhovaného přístupu jako případný poradenský nástroj pro ATCO. [4]

Čtvrtá analýza nese název “Taxiing Route Scheduling between Taxiway and Runway in Hub Airport”, kde pojednává o vytvoření optimalizačního modelu pro plánování tras pojíždění mezi vzletovou a přistávací dráhou a pojížděcími plochami v uzlu letiště, která by zaručila provozní bezpečnost letiště a zlepšila efektivitu pozemního provozu. Analýza si klade za cíl snížení celkového času a délky trasy pojíždění letadel a zkrácení doby čekání. Byl navržen vylepšený algoritmus pro simulaci a ověřování. Výsledky simulace ukazují, že ve srovnání s metodou optimalizace došlo ke snížení celkové vzdálenosti pojíždění a celková doba zpoždění se také snížila. Navíc model zaručuje nepřetržité pojíždění pro všechna letadla bez konfliktu. V této studii se našlo optimální řešení v souladu s očekáváním, ačkoliv plánování pojíždění letadel po pojezdových plochách v kooperaci s chodem vzletové a přistávací dráhy není nikterak jednoduchý úkon. [5]

Pátý článek s názvem “Multi-Airport System Simulation and Optimization Research” analyzuje problém nemožnosti uspokojení současné konstrukční kapacity se zvyšující se budoucí poptávkou v rámci rozvoje průmyslu letecké dopravy. Předmětem tohoto výzkumu je zejména letištní systém. Hlavním problémem ovlivňující kapacitu byla identifikována menší kapacita dílčích úseků trasy. Prostřednictvím simulace reálné situace byl získán model optimalizace systému více letišť. [6]

Po optimalizaci byl získán výsledek letového řádu, kde byla úroveň zpoždění snížena, který potvrzuje platnost simulace a optimalizace. Náklady na zpoždění u systému více letišť se snižují, tedy se zvyšuje provozní efektivita a ekonomický přínos. [6]

Šestá studie s názvem “A New Modeling Capability for Airport Surface Traffic Analysis” se zabývá vylepšením provozu na letišti. V simulaci byla namodelována dynamika pohybu letadel, ve které byl sledován pohyb každého letu. Vyhodnocovaly se situace, kdy docházelo k přidělování trasy, zjišťovaly se a řešily se případné konflikty a vyhodnocovala se propustnost a zpoždění provozu. Model byl simulován pomocí platformy STLE. Jedná se o systém procházející dalším vývojem pro zlepšení modelování a použitelnosti. [7]

Jedná se o preliminární studii, jak se dá systém aplikovat v rámci prostředí letiště. Závěrem existují další způsoby a programy, které jsou vhodné pro simulování dané problematiky.

## 1.2 Řízení letového provozu

V této kapitole budou podrobně rozpracovány služby řízení letového provozu, budou zmíněny všechny potřebné služby a jejich rozdělení. Dále se pak práce podrobně zaměří na všechna pracoviště stanoviště TOWER, příslušné pracovní pozice a jejich povinnosti, které lépe přiblíží danou problematiku v dalších kapitolách. Na základě této kapitoly byly vybrány zajímavé procesy, které spadají do každodenních záležitostí řídicích letového provozu v rámci procedur na letišti. Pro detailnější pochopení bylo potřeba specifikovat potřebné úlohy řídicích letového provozu, protože modelování jejich činnosti je dílčí část praktické části.

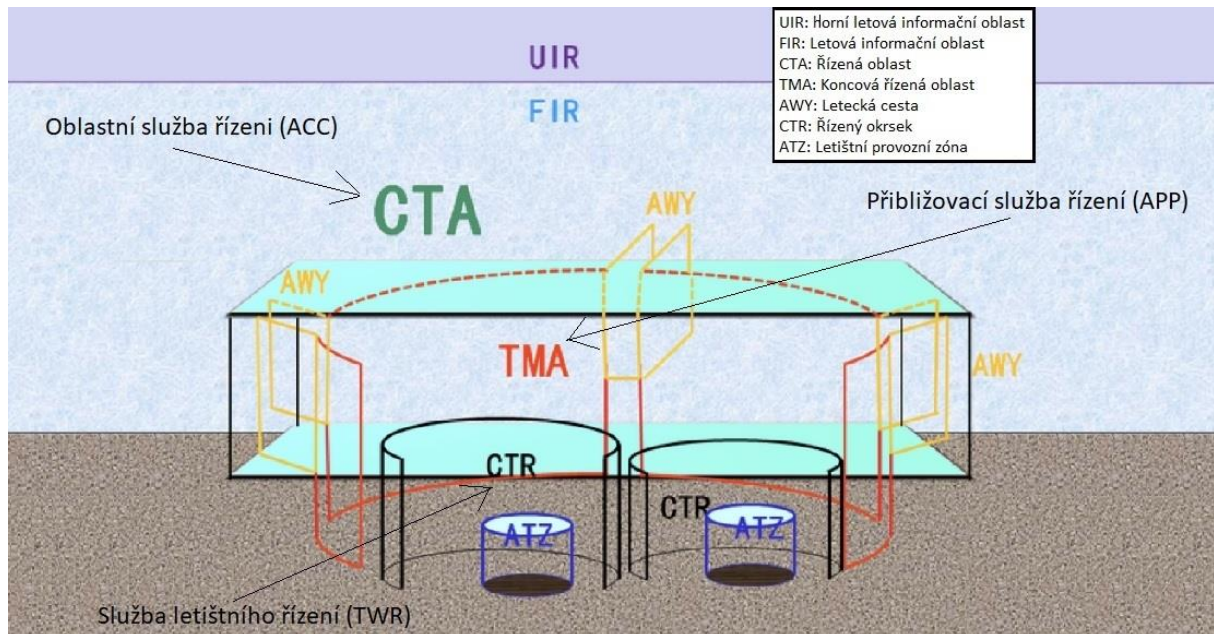
Řízení letového provozu zahrnuje službu poskytovanou pozemními řídicími letového provozu, kteří řídí letadla na zemi i ve vzdušném, řízeném prostoru. Primární a nejdůležitější úkol služby ATC je organizovat a urychlovat tok letového provozu, pomocí rádia podávat pilotům informace, a hlavně předcházet možným kolizím letadel na ploše i ve vzduchu.

### **Air Traffic Control Service**

Hlavním cílem řízení letového provozu je zefektivnit pohyb letadel ve vzduchu a na zemi, aby nedocházelo k zbytečným opožďováním a čekání letadel během letového toku s velkým důrazem na bezpečnost. Za tímto účelem se vzdušný prostor dělí do samostatných oblastí,

kteřé jsou řízeny jednotlivými službami ATC v závislosti na jejich vlastnostech, které budou popsány níže. [8]

Na obrázku 1.1 je vidět rozdělení sítě leteckých tras vždy s příslušným stanovištěm ATC.



Obrázek 1.1 - Rozdělení a řízení vzdušného prostoru [9] (upraveno autorem)

Služba řízení letového provozu je hlavní služba poskytovaná řídicími letového provozu, která má tři základní stanoviště:

- Aerodrome Control Service (TWR)
- Approach Control Service (APP)
- Area Control Service (ACC)

### **Aerodrome Control Service (TWR)**

Službu letištního řízení poskytuje řídicí věž TOWER, která je zřízena za účelem efektivního poskytování letových provozních služeb letištnímu provozu řízeného okrsku (CTR – control zone). Úkolem této služby je řízení provozu na ploše, pojezdových drahách (TWY), vzletových a přistávacích drahách (RWY) a současně se zaměřuje na nejbližší okolí letiště. Služba TOWER zajišťuje nejen bezpečný provoz letadel, ale i pozemních vozidel, která se pohybují na letištní ploše. Dále se tato služba, na letištích s větším provozem, dělí na tři pracoviště: [8]

- DELIVERY – hlavním úkolem stanoviště DELIVERY je povolování spouštění motorů a vydávání odletových povolení.
- GROUND – náplň práce stanoviště GROUND je vydávání povolení k vytlačování letadla ze stojánky a dále řídí provoz letadel na pohybové ploše a pojezdových drahách až k samotnému holding pointu.
- TOWER – stanoviště TOWER má na starosti řízení vzletů, přistání letadel a povolování samotného vstupu na dráhu. [8]

Na většině letišťích je nejbližší okolí letiště řízena službou Aerodrome Control Service (TWR), avšak na letišti Václava Havla v Praze se jedná o menší výjimku, zde se využívá služba Praha/Ruzyně information, která má delegované VFR tratě. [8]

### **Stručný průběh řízení řídicích letového provozu (ATCO)**

Při navázání spojení s Delivery (CDD - Clearance Delivery Dispatcher) posádka obdrží odletové povolení, které v sobě obsahuje letiště určení (ADES), standardní přístrojový odlet (SID), počáteční stoupání a squawk, dále se ověří přijatá informace ATIS, tlak QNH a aktuální čas. V tuho chvíli se předpokládá, že letadlo má v systému A-CDM zadán čas TOBT, pokud ne, ATCO upozorní pilota, aby tento čas prostřednictvím handlingu zadal.

Následně posádka na základě vygenerovaného TSAT obdrží od CDD povolení ke spouštění motorů a přechází na kmitočet GND.

Pokud je to nezbytné a letadlo stojí na stání typem nose-in, tedy samo se nedokáže z místa vytlačit, pracoviště Ground vydá povolení k vytlačení (push back). Následně vydává instrukce k pojíždění, a to buď přímo na vyčkávací místo RWY, nebo např. při nutnosti odmrazování vydává instrukce k pojíždění na odmrazovací stání. V některých případech je možné odmrazování provádět přímo na stání, na kterém je letadlo odbaveno.

Jakmile je letadlo připraveno ke vzletu, přechází na kmitočet TWR, kde obdrží instrukci ke vstupu na dráhu (line up), a následně ke vzletu (take off).

### **Approach Control Service (APP)**

Přibližovací služba řízení letů APPROACH má na starosti řízení odletů a příletů v prostoru odpovědnosti. Služba APPROACH propojuje letištní a oblastní řízení a konkrétně se zaměřuje na fáze stoupání, klesání a přiblížení letadel k letišti. [8]

## **Area Control Service (ACC)**

Oblastní služba řízení má na starosti lety v řízených oblastech. Převážně je tato služba zaměřena na cestovní část letu (traťovou část). [8]

Pro záměry této práce je potřeba detailnějších znalostí zaměřených na službu letištního řízení TOWER a konkrétní pracoviště DELIVERY a GROUND.

### **1.2.1 Povinnosti Watch Supervisor/Senior Controller (WS/SC) TWR**

WS/SC TWR tvoří vedoucího směny na stanovišti, jak na stanovišti TWR, tak na APP s výjimkou, že na stanovišti APP tuto roli zastupují dva lidé, naopak na stanovišti TWR pouze jedna osoba a ta s platnými oprávněními pro řízení letového provozu, a tedy SC TWR. Vedoucí směny zodpovídá za organizační a správný chod směny a služby ostatních pracovníků na směně na daném stanovišti. Pokud kdokoliv na směně potřebuje radu či pomoc, obrací se na vedoucího směny, který obratem problémy řeší. [10]

Dále má za povinnost seznámit se s nařízeními a dokumenty, pokud se od jeho poslední směny nějaké změnil, s platnými NOTAMy a omezeními. Pracovník WS/SC TWR má za úkol řídit chod na stanovišti, přidělovat úlohy jednotlivým pracovištím A-SMGCS a v něm přidělovat Safety Nets příslušným rolím a obsluhovat ATM systémy a přidělená technická zařízení. Dle publikované doby má za úkol aktivovat, případně deaktivovat pracoviště TWR TWR (např. slučovat pracovní místo TEC/TPC či GEC/CDD). To samé se může stát s pracovištěm Delivery, které se v době deaktivace sloučí s pracovištěm Ground. Dále má vedoucí směny na starosti provádění briefingu ATCO, kteří právě nastupují do směny a o všem je informovat, sledovat vývoj meteorologické situace na letišti a v jeho blízkosti a na jeho základě stanovit RWY v používání, které konzultuje s pracovištěm SC APP. Dále musí vědět o všech ATM systémech a jejich provozuschopnosti a o provozuschopnosti radionavigačních, radiokomunikačních a dalších zařízeních na letišti Praha Ruzyně, která jsou nezbytná pro poskytování letištní služby řízení letového provozu. Mezi další povinnosti přibude v určitých případech vedoucímu směny možné vyhlášení období nouze a stupně pohotovosti pro HSZ LP, na pracovišti vést provozní deník a předávací protokol, kam se zaznamenávají veškerá hlášení, která mají přímý dopad na poskytování letových provozních služeb a koordinaci určitých vývojových situací s dalšími pracovišti. [10]



### **1.2.2 Povinnosti Planning Controller/Executive Controller (PC/EC) a pracovního místa Delivery (CDD)**

Jako všechny pozice na jednotlivých stanovištích i povinnost pozice PC/EC a CDD je těsně před začátkem řízení se seznámit s provozní situací a její převzetí pomocí ID karty. Pokud od poslední směny uplynul delší čas, má pracovník povinnost se seznámit s nařízenými dokumenty, NOTAMy a omezeními, které jsou v daném momentě platné. Dále musí během služby neustále sledovat provozní situaci a mít přehled o stavu zařízení, která jsou nezbytná pro výkon služby. Další povinností tohoto stanoviště je provádět letovou informační službu a předávat SC TWR veškeré informace, které mají vliv na poskytování ATS na daném stanovišti. [10]

Za účelem bezpečného a plynulého poskytování ATS spolu musí PC a EC neustále spolupracovat po celý čas směny. Pokud provozní situace dovolí, PC sleduje poskytování ATS EC a v případě podezření snížení minima rozstupu je povinen ihned upozornit EC. Tyto postupy se týkají pouze stanoviště TWR, kde se nachází stanoviště TPC a TEC, na všech ostatních stanovištích je vždy tato role zastoupena jen jednou osobou, a tedy EC plní roli i PC. [10]

### **1.2.3 Povinnosti pracovního místa Tower Executive Controller (TEC)**

TEC má za úkol neustále sledovat letištní provoz a veškeré podmínky, které jsou v daném čase na provozní ploše. V určitých případech, na žádost TPC/GEC má za povinnost pomocí systému A-SMGCS delegovat odpovědnost za využívání jednotlivých RWY. Na stanoviště PEC předávat rozstupy mezi letadly na přiblížení, vyhlašovat a případně ukončovat provoz LVP a pro jednotlivé RWY nastavovat SZZ, ILS pomocí systému AMS. Další povinností TEC je předání letadla k dalšímu řízení v momentě, kdy letadlo přistane a opustí dráhový systém stanovišti GEC. A v neposlední řadě zastupovat povinnosti stanovišť GEC, CDD a TPC v době, kdy nejsou aktivována, nebo jim skončila provozní doba. [10]

### **1.2.4 Povinnosti pracovního místa Tower Planning Controller (TPC)**

Stanoviště TPC aktivně využívá funkci EFSS, kterou napomáhá stanovišti TEC. Funkcí EFSS spravuje data ve stripech, případně vytváří nové stripy, nebo do již vytvořených vpisuje nezbytné poznámky. Na žádost může ovládat povelová tlačítka, která souvisí s vydáváním

letových povolení. Dalšími úkoly jsou telefonické koordinace, řízení provozu mobilních prostředků a starání se o radiostanici 121,710 MHz. Pomocí systému A-SMGCS přebírat odpovědnost za využívání jednotlivých RWY. Společně s GEC stanovit povolení vstupu MMP na provozní plochu. Předávat veškeré informace o VFR příletech na pracoviště CDP OP JIH a na pracoviště CDP předávat informace o letech, která měla ADES LKPR a jsou přeměrována na jiné AD a současně předávat informace o letech, která se na LKPR vrací po jejich vzletu. Na pracoviště ARO předávat informace o časech přistání letadel, která byla na LKPR přeměrována a současně časy přistání letadel, která se na LKPR vrátila po jejich vzletu. A v neposlední řadě má společně s pracovištěm DEC koordinuje vzlet z jiné dráhy, než je ta v používání. [10]

### **1.2.5 Povinnosti pracovního místa Ground Executive Controller (GEC)**

Zde se přesouvají letadla po přistání, která převádí pracoviště TEC a pracoviště GEC je řídí až na hranici provozní plochy a dále letadla předává pracovišti SMC. Povinností GEC je vydávání povolení k vytlačení a následnému pojiždění s ohledem na vytváření vhodného pořadí letadel na vzlet, s ohledem na pravidla pro přednost při vydávání letových povolení, v případě, že letadlo v době žádosti o povolení nemůže odletět v souladu s CTOT, tak povolení nevydat, s ohledem na typy, velikosti letadel a směry odletu a s ohledem na postupy A-CDM. Pracoviště GEC dále řídí odmrazování letadel, zajišťuje doprovodná vozidla Follow me pro SD lety, společně s pracovištěm TPC stanovuje pohyb MMP na provozní ploše a současně vydává TPC povolení vstoupit na provozní plochu. Další povinností společně s pracovištěm TEC je pomocí systému A-SMGCS stanovit odpovědnost za využívání jednotlivých RWY. Další z povinností GEC je na vyžádání velitele letadla předat žádost na SMC o doprovod letadla ze stání/na stání a ve výjimečných případech je možnost vést vozidlo po ploše, upřednostňována jsou velká letadla jako je Airbus 380, Boeing 747, nebo Ruslan 124. [10]

Na většině stání, aby letadlo bylo schopno zastavit přesně na příčce zastavení, musí být naváděno. Na letišti v Praze jsou dvě možnosti, první je pomocí zabudovaného systému APIS++ na stání, v případě stání, která tímto systémem nejsou vybavena, je třeba využít pro zavádění letadel na stání pomocí vozidla follow me. Zavedení letadel pomocí vozidla follow me se na řízeném letišti využívá skoro kdekoliv, kde není na stání zaveden systém Visual Docking Guidance System (APIS++). Na Ruzyni v Praze je systém Visual Docking Guidance

System zaveden v areálu Sever, na stáních 1 až 31, tedy zde se pomocí vozidla follow me letadla nezavádí, pouze ve výjimečných případech a výpadku systému Visual Docking Guidance System. Naopak na odbavovací ploše Východ, odbavovací ploše Jih, odbavovací ploše Bell a na všech volných stáních na odbavovací ploše Sever je letadlo zavedeno na stání pomocí vozidla follow me. [10]

Při podmínkách LVP je povinnost vést vozidla na odbavovací ploše pomocí vozidla follow me. Vozidlo follow me čeká na hranice odbavovací plochy a dovede letadlo až na odbavovací stání, výjimkou je stání 16, kde i za podmínek LVP funguje Visual Docking Guidance System (APIS R). [10]

### **1.2.6 Povinnosti pracoviště Delivery (CDD)**

V souladu s platnými postupy A-CDM je pracoviště CDD povinno vydávat povolení ke spouštění pohonných jednotek. V případě nepoužití postupů A-CDM je pracoviště povinno předat čas CTOT ještě před vydáním povolení spouštění pohonných jednotek a zasílat zprávy REA a v případě změny vydávat letadlům nové časy CTOT. Další povinností pracovníka CDD je letadlům předávat odletová povolení dle pravidel a za podmínky, že je nutné využít jinou RWY než je QFU nebo v případě nemožnosti dodržení SID vydávat odletové povolení na DEC (APP). Následná povinnost spočívá v kontrole potvrzení hodnoty QNH a kontroly aktuální zprávy ATIS, dále na zamýšlené odlety letadel VFR bez FPL, na které se vytváří EFSS a v němž mají pracovníci CDD povinnost vyplnit chybějící, nezbytné údaje o daném letu. [10]

### **1.2.7 Povinnosti instruktora (OJTI)**

Instruktor neboli OJTI je instruktorem pro žáky, kteří se zacvičují na pozici řídicího v letovém provozu. OJTI má před zahájením výcviku za povinnost ověřit funkčnost soupravy odvysíláním první provozní relace. Při samotném výcviku je nutnost vždy používat náhlavní soupravu pro OJTI, aby fungovala možnost “override”, která poskytuje instruktorovi možnost převzít řízení provozu a zabránit nežádoucím problémům. [10]

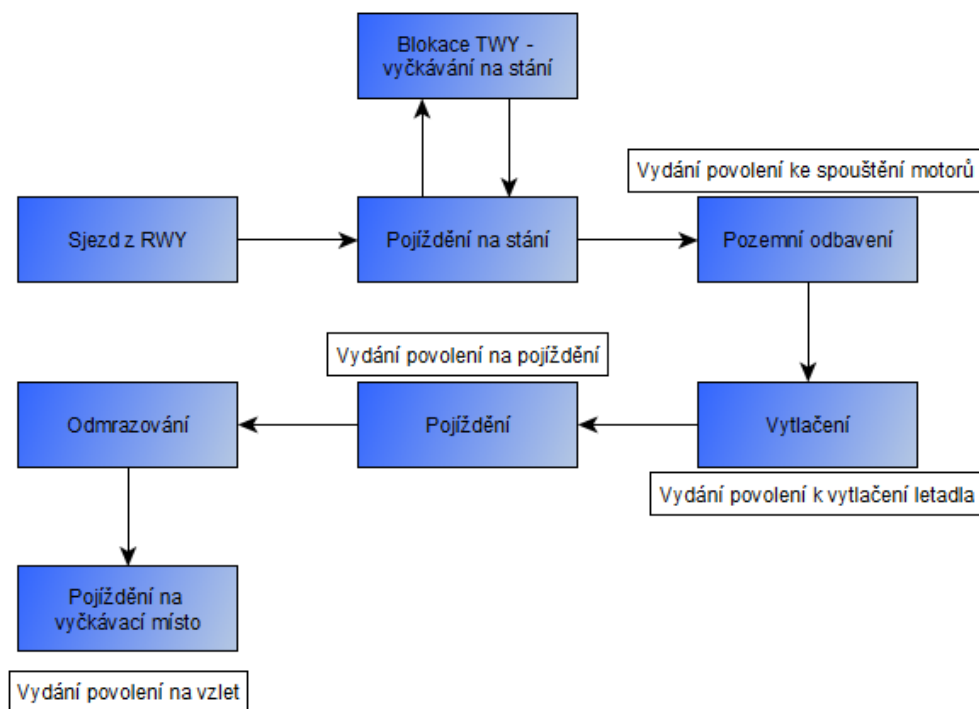
Pracoviště TWR vždy odpovídá za poskytování letových služeb ve svém AoR. [10]

## 2. Popis procesů na LKPR

Níže jsou popsány procesy, které spadají do řešené problematiky ATC v průběhu postupu letadla od sjezdu z RWY až po dojezd na stání a v opačném případě od úkonů na stání až po dojetí na vyčkávací místo před dráhou.

Celý proces zpracovávané problematiky vypadá přesně takto: sjezd z RWY – pojíždění na stání – pozemní odbavení – případné vytlačení ze stání – pojíždění – případné odmrazování – pojíždění na vyčkávací místo. Další problematikou, na které během těchto procesů ATCO dává pozor je volba vhodné cesty, se kterou souvisí řešení případných kolizí, nebo určitých sporných situací. Těmito situacemi je například myšleno, když jedno letadlo musí určitou chvíli vyčkat a dát jinému letadlu přednost. Dále se práce zaměřuje na řešení konkrétní problematiky v zálivech, současného vytlačení ze stání, koordinace těchto letadel s letadly přijíždějícími na stání a kooperace jízdy v křižovatkách pro urychlení toku letadel a optimalizování procesů.

Na obrázku 2.1 níže je samotný proces znázorněn (modré obdélníky), kde jsou dále znázorněny jednotlivá povolení, která vycházejí z řídicí věže (bílé obdélníky).



Obrázek 2.1 - Jednotlivé procesy v rámci pojíždění na letišti a k nim příslušná povolení

## 2.1 Start-up

Při letových plánech IFR probíhá komunikace mezi pilotem a ATC již při spouštění motorů, abychom získali informaci o čase nastartování motoru, pojíždění a povolení. [8]

Schválení ke spouštění motorů neznámá schválení k vytlačení. O schválení k vytlačení musí letová posádka požádat na pracovišti Ground, v ojedinělých případech a hodinách na pracovišti Tower, dle jejich provozní doby. V případě, že letová posádka potřebuje provést spuštění motorů před TSAT z technického důvodu, požádá ATC. O schválení k vytlačení nebo o povolení k pojíždění musí letová posádka požádat pracoviště Ground, nebo Tower, opět dle provozní doby. Vytlačení a pojíždění musí být zahájeno neprodleně po schválení od ATC, který povolení vydává. Neočekávané zdržení musí letová posádka okamžitě oznámit na příslušném pracovišti. [11]

## 2.2 Push-back

Základní pravidla pro vytlačení letadla:

- Pro vytlačení letadla na správnou pozici jsou na letišti zřízené příčky pro vytlačení, které jsou označené žlutým pruhem s délkou 6 metrů a nápisem PUSH 1 až PUSH 7.
- Letadlo s rozpětím křídel nad 36 metrů může být vytlačeno pouze v případě, když je přílehlý pojezdový pruh neobsazen.
- Proces vytlačení se ukončuje kokpitem letadla na příčce PUSH, nebo kabinou tahače na úrovni mezilehlého vyčkávacího místa TWY.
- Minimální určený rozstup od křídel letadel se dělí dle kódového písmena letadla:
  - Letadla s kódovým písmenem C mají možný rozstup 4,5 metru.
  - Letadla s kódovým písmenem E a F mají možný rozstup 7,5 metru.

K vytlačení letadla ze stání dochází po ukončení veškerých odbavovacích procesů, odpojení nástupního mostu, nebo schodů a odpojení pozemní energetické jednotky (GPU). Těsně před započítím probíhá poslední kontrola, zda jsou všechna dveře letadla zcela uzavřena a zda letadlu nestojí nic v cestě. Dále se odstraní rozmístěné kužele a klín z předového podvozku. Dochází k připojení tahače a umístění odpojovacího čepu, aby bylo možné bez problému ovládat směr vytlačení. Po jeho připojení následuje odstranění posledního klínu z hlavního

podvozku letadla a už se čeká pouze na signál od posádky, že je připravena na vytlačení letadla ze stání. [11, 12]

Po vydání signálu posádkou je letadlo vytlačeno na příslušnou push pozici. Po dokončení vytlačení je od letadla odpojen tahač a vytažen odpojovací čep, kterým se znovu zapojí hydraulický systém předového podvozku. Po tomto úkonu vozidlo s tahačem opustí prostor a pověřená osoba vydá signál směrem k posádce o dokončení procesu vytlačení. [11, 12]

Pro vrtulová letadla s MTOW MAX 30 tun a za podmínek dohlednosti větší nebo rovné 400 metrů je povolen výjezd ze stání “NOSE-IN” režimem “POWER BACK”. Procedura “POWER BACK” musí být provedena za asistence dvou pracovníků handlingové společnosti. Povolení platí pouze pro:

- 1) stání 50 až 58 na odbavovací ploše SEVER,
- 2) stání 60 až 64 na odbavovací ploše SEVER,
- 3) stání 70 až 75 na odbavovací ploše SEVER,
- 4) stání E3, E4 a E5A na odbavovací ploše VÝCHOD. [11]

## 2.3 Taxiing

Pojezdové dráhy poskytují letadlům nejrychlejší a jediný způsob, jak se přepravit z RWY do různých prostor letiště a naopak. Letiště Václava Havla v Praze je vybaveno systémem pojezdových drah, které mají označení písmeny A-H, J, L, P, Q, R, S, T, Z, AA, A1, B1, B2, H1, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 a (FF). V areálu JIH se nacházejí pojezdové dráhy s označením L, P, Q, R, S, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5. V areálu SEVER se nacházejí pojezdové dráhy s označením A-H, J, L, T, Z, AA, A1, B1, B2 a H1. Dalším dělením zde na letišti je pojezdová dráha A1, která je spojena s pojezdovou dráhou A, pojezdové dráhy B1 a B2 vystupují z pojezdové dráhy B a jsou umístěny mezi prsty A a B terminálu 1. Pojízďení po pojezdové dráze B2 na stání 12 je možné pouze s letadlem o rozpětí křidel 65 metrů. Pojezdové dráhy J BLUE a J ORANGE vystupují z pojezdové dráhy J a jsou umístěny mezi prsty B a C. V úseku mezi pojezdovou dráhou G a pojezdovou dráhou H je pojezdové dráhy J BLUE a J ORANGE možné používat pouze v době od úsvitu do setmění, což se mění dle ročního období. Dále se tyto dráhy v celé své šíři dají používat pouze za dohlednosti větší nebo rovné 400 metrů. Mezi další specifika těchto drah patří jejich využití pouze letadly s rozpětím křidel do 36 metrů.

Omezení využívání pojezdových drah pro letadla s rozpětím křídel do 36 metrů platí dále na pojezdových drahách H1 a H, ale jen v úseku mezi křížením pojezdové dráhy L a pojezdové dráhy J a na pojezdových drahách B1 a B2 kromě stání 4A a 14, kde je omezení rozpětí křídel letadla zvýšeno na 52 metrů. Další omezení pro rozpětí křídel letadel do 52 metrů platí na pojezdových drahách A1 stání 2, na pojezdové dráze AA a H mezi pojezdovými drahami J a B. Na pojezdové dráze A1 stání 1 je nyní možné dojet s letadlem o rozpětí křídel do 65 metrů a u těžé pojezdové dráhy stání 3 je nyní možné dojet s letadlem o rozpětí křídel až 68,5 metru. Další restrikcí ohledně rozpětí křídel letadla je v bodě pojíždění z pojezdové dráhy A na pojezdovou dráhu H pro letadla s rozpětím větším než 36 metrů povoleno pouze ve směru od THR RWY 24, v opačném směru je pravidlo totožné. Pravidlo při pojíždění ze stání 58 po pojezdové dráze H směrem k pojezdové dráze L a F je umožněno pouze pro letadla s maximálním rozpětím křídel do 65 metrů. Pojíždění z pojezdové dráhy L na pojezdovou dráhu P ve směru od pojezdové dráhy F, nebo z pojezdové dráhy P na pojezdovou dráhu L ve směru k pojezdové dráze F je povoleno pouze pro letadla s rozpětím křídel do 36 metrů. Dalším omezením je na pojezdové dráze Q mezi pojezdovými drahami Q1 a Q5 omezení rychlosti pojíždění letadel s rozpětím křídel větším než 36 metrů na 10 kt. Pojezdové dráhy Q2 a Q v úseku mezi pojezdovými drahami R a Q2 jsou použitelné pro letadla o rozpětí křídel 36 až 69 metrů pouze v případě pojíždění na stání S6A. Pojezdová dráha Q3 je taktéž použitelná pro letadla s rozpětím křídel 36 až 69 metrů pouze v případě odletu ze stání S6A. Použití těchto pojezdových drah letadly o rozpětí křídel 36 až 69 metrů je možné pouze v případě aplikování zvláštních postupů provozovatele letiště. Pojezdová dráha FF je dlouhodobě uzavřena pro veškerý provoz letadel. Obecně pojezdové dráhy dosahují šířky 22,5 metrů vyjma pojezdových drah P a Q v místě mezi pojezdovými drahami L a Q5, u kterých jejich šířka činí 40 metrů. [11]

Z osmi pojezdových drah označených A-F, L a Z, které jsou připojeny k hlavní dráze 06/24, jsou pouze pojezdové dráhy L a D připojeny pod ostrým úhlem třiceti stupňů. Tento způsob připojení pojezdových drah k dráze hlavní se využívá, protože umožňuje odbočení přilétávajících letadel při vyšších rychlostech, než je tomu na obvyklých výjezdech. Dalším benefitem je pak snížení doby obsazení dráhy pojezdem letadel na co nejmenší čas. [11]

V tabulce 2.1 je vidět omezení na rozpětí křídel letadla pro konkrétní pojezdové dráhy.

V roce 2022 byla stavba pojezdových drah lehce renovována a to tak, že v severní části vznikl nový záliv a s ním zanikla pojezdová dráha s označením K a vznikla nová pojezdová dráha s označením L1. O rok dříve došlo v jižní části letiště k prodloužení a napojení nové TWY R na odbavovací plochu J1H a vybudováním nových odbavovacích stání před hangáry C a N. [18]

TWY	kódové písmeno/code letter	MAX rozpětí/wingspan of ACFT
AA	D	52 m
A1 mezi stánkami / between stands 1 a/and 3	D	52 m
B1	C	36 m
B2	C	36 m
TWY H mezi/between TWY L a/and TWY B2	C	36 m
H1	C	36 m
J BLUE	C	36 m
J ORANGE	C	36 m
L1	C	36 m
Q mezi TWY Q1 a výjezdem ze stání S19 / Q between TWY Q1 and S19 stand exit	C	36 m
Q1 mezi/between TWY Q a stání / and stand S9	C	29 m
Q1 mezi stáním / between stand S9 a odbavovací plochou / and apron Bell	B	19,5 m
Q2	C	36 m
Q3	C	36 m
Q4	B	24 m
Q5	C	29 m
S	C	36 m

Tabulka 2.1 - Jednotlivé TWY a omezení na maximální rozpětí letadla [11]

## 2.4 Příjezd na holding point

Na letišti se nachází dvě vyčkávací místa, jedná se o mezilehlé vyčkávací místo nebo vyčkávací místo dráhy, které je posledním bodem před samotným vstupem letadla na dráhu. [11]

Mezilehlé vyčkávací místo (MVM) je místo, které je určené pro řízení letového provozu, na kterém pojíždějí letadla a mobilní prostředky, která mají povinnost na těchto místech zastavovat a vyčkat, dokud nedostanou povolení z letištní řídicí věže o možném pokračování. [11]

Vyčkávací místa hlavní dráhy jsou místa, která spojují RWY s přilehlou pojezdovou dráhou z vjezdového směru. Je to poslední místo před vstupem na samotnou dráhu. Na letišti v Praze máme vybavena vyčkávacími místy a to pro CAT I a i vyčkávacími místy pro CAT II/III, které slouží pro letadla, která odlétají z dráhy RWY 24. [11]



## 2.5 Odmrazování letadel na LKPR

Na letišti Václava Havla v Praze je odmrazování letadel možné pouze na určitých místech. Na odbavovací ploše SEVER to jsou konkrétní De-icing area 1-6 a TWY J, na odbavovací ploše VÝCHOD je to povoleno na všech stojánkách a na odbavovací ploše JIH jsou k tomuto úkonu určené stojánky S1 – S9. [11]

Na stojánkách jsou označené příčky, které slouží pro zastavení letadel na úrovni kabiny pilota. Příčky jsou rozdělené podle velikosti rozpětí křídel letadla na De-icing 36m, De-icing 52m a De-icing 65m, kde číslo vždy označuje maximální rozpětí křídel letadla. [13]

Na odmrazovacích plochách DA2 a DA3 mohou být letadla umístěna i v opačném směru, ale za podmínky, že jsou na stojánku navedená vozidlem Follow me. [13]

Odmrazovací místo DA2 slouží pro odmrazování kritických typů letadel, s rozpětím křídel od 65 metrů do 80 metrů, kam musí být vždy zavedeno vozidlem Follow me a to vždy ze směru od TWY A1. [13]

V případě kritických typů letadel Airbus 340-600, Airbus 350-1000 a Boeing 777-300/300 ER slouží pro odmrazování odmrazovací místo DA1. [13]

Samotné odmrazování letadla není v kompetenci ATC, ale daný úkon se provádí v rámci pojíždění na vyčkávací místo u dráhy, proto je zde taktéž zmíněn.

## 2.6 Vybrané provozní procesy

Pro simulaci řízení letového provozu v rámci procesu pojíždění, o kterém bude podrobněji psáno níže byly vybrány čtyři provozní procesy, na které je kladen v rámci modelu ATC velký důraz. Podrobně jsou znázorněny všechny vlivy ATC, které působí na jednotlivé procesy.

Zvolený přístup je zaměřen na tvorbu modelových situací, které jsou realizovatelné v prostředí pražského letiště. Modelovanými situacemi jsou:

- změny směru pojiždění letadel na pojezdových drahách
- konfliktní segmenty
- řešení křižovatek
- řešení zálivů

## **3 Modelování systémů a volba vhodného prostředí pro simulaci**

Pro potřeby této práce byl zhotoven model za využití programu AnyLogic, jehož parametry budou popsány níže. Úkolem tohoto simulačního modelu je replikování reálné situace jednotlivých procesů na pojezdových drahách s prvkem řídicího letového provozu. Hotový model se skládá ze dvou propojených částí. První z nich je grafická část modelu, která v sobě zahrnuje zmenšený pojezdový systém s pojezdovou dráhou, několika křižovatkami a zálivem se stáními. Druhá část obsahuje logický model, který řídí procesy v grafické části. Logická část obsahuje blokový diagram, který se skládá ze stavebních bloků, na které byla využita knihovna zvaná Rail library, slouží pro vytvoření celkového provozu letadel. Svou knihovnou a pravidly pro provoz nejvíce připomínala provoz na letišti. Druhou knihovnou je Process Modeling Library, ze které jsou vzaty určité bloky a funkce, které umožňují doplnit a rozvinout celý proces. Volba těchto knihoven vycházela z již vyhotoveného modelu, který vytvořil Ing. Had, kde byla ověřena jejich funkčnost a který bude přiblížen v dalších kapitolách. [14, 17]

### **3.1 Simulačního prostředí - Anylogic**

Pro diplomovou práci bylo využito simulační prostředí AnyLogic, vyvinuto firmou The AnyLogic Company (Illinois, Spojené státy americké). Jedná se o simulační nástroj, který umožňuje vytvářet modely prostřednictvím tří metod simulačního modelování, které se odlišují využitím různých specifických mechanismů pro modelování vazeb mezi jednotlivými elementy dynamických systémů. [14]

Simulační prostředí AnyLogic nabízí tyto metody:

- Systémová dynamika
- Multiagentní modelování
- Diskrétní modelování

### **3.1.1 Multiagentní modelování**

Metoda multiagentního modelování je ze všech možných metod, které simulační prostředí AnyLogic nabízí, ta nejnovější. Při tomto způsobu modelování je kladen největší důraz na výměnu informací a celkově je celé modelování založeno na komunikaci mezi agenty, které se od sebe liší mírou detailnosti. Od detailních modelů, kde agenti představují fyzické, konkrétní objekty až po vysoce abstraktní modely, ve kterých agenti představují celé projekty. [14, 15]

Simulovaný model je zaměřený na komunikaci agentů mezi sebou. Každý agent má v sobě sadu pravidel, která daného agenta v každém okamžiku řídí a představuje vzájemné vazby a komunikaci jednoho agenta s dalšími. [14, 15]

Na rozdíl od systémové úrovně je multiagentní modelování zaměřené na jednotlivé přístupy k návrhu modelu. Při navrhování modelu je důležitá identifikace aktivních agentů, kterými mohou být lidé, zvířata, projekty, majetek a mnoho dalšího. Dále se definuje jejich chování, umístění do určitého prostředí, kde mohou navázat různá spojení a na závěr se spouští samotná simulace. [15, 16]

Modelář v multiagentním modelování se přímo zaměřuje na jednotlivé objekty v organizaci a kolem ní, jejich individuální chování a komunikaci. Model zaměřený na agentech je ve skutečnosti souborem interagujících agentů, kteří odrážejí objekty a vztahy v reálném světě. [15, 16]

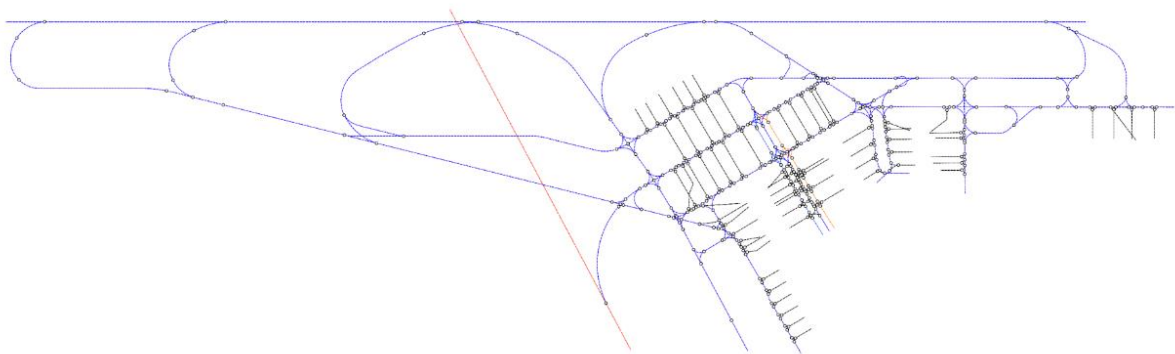
Tento postup byl zvolen z více důvodů. Prvním důvodem je vyhovující metoda pro mé potřeby zpracování modelu s vybranou knihovnou. Druhým důvodem je, že zvolená metoda umožňuje komunikaci agentů mezi sebou, která je pro práci stěžejní. Souběžně je vhodné zmínit, že možnost aplikace tohoto modelování (pro potřeby znázornění letištního provozu) prokázal ve své práci Ing. Had. [17]

### **3.1.2 Předchozí verze modelu**

Diplomová práce Ing. Hada se zabývá simulováním modelu v rámci provozu letadel na letišti v Praze. Replikuje reálnou situaci infrastruktury severní části letiště s hlavní vzletovou a přistávací dráhou, která je převzata z grafické části modelu a znázorněna na obrázku 3.1.

V práci je řešeno několik dílčích celků, které na sebe navazují, kterými jsou: přistání a vyklizení RWY, poježdění na stání, pozemní odbavení, vytlačování, poježdění na RWY a odlet. [17]

Složka, kterou se diplomová práce Ing. Hada podrobně nezabývá a nebyla v práci nikterak definována je role ATC. Pro funkci modelu určitá pravidla být zavedena musela, ale nebyl to její cíl. Naopak má práce si klade za cíl vyhotovení modelu ATC v rámci určitých procesů na letišti. Podrobnější srovnání popisují v kapitole 4.1. [17]



*Obrázek 3.1 – Převzatá grafická část existujícího modelu [17]*

V logické části modelu Ing. Hada je vypořádáno několik bloků, které slouží jako podstatný základ logického modelu a následně navazuje několik vytvořených agentů, kteří tvoří funkčnost celého modelu. Vzhledem k návaznosti mé práce jsou použity stejné knihovny a totožné prvky pro modelaci procesů s rozdílem, že je zcela upravena jejich specifikace pro poježdění na letišti a jsou rozšířeny o bloky pro podrobnější popis daného úkonu. [17]

## **3.2 Koncepce současného modelu**

Zde je uvedeno rozdělení technické stránky práce do dvou částí, grafické části a logické části. V grafické části je znázorněna část pojezdového systému modelu. V logické části jsou naopak řešeny jednotlivé procesy, funkce a nastavení funkčnosti celého modelu. Obě části jsou popsány v kapitolách 3.2.1 a 3.2.2.

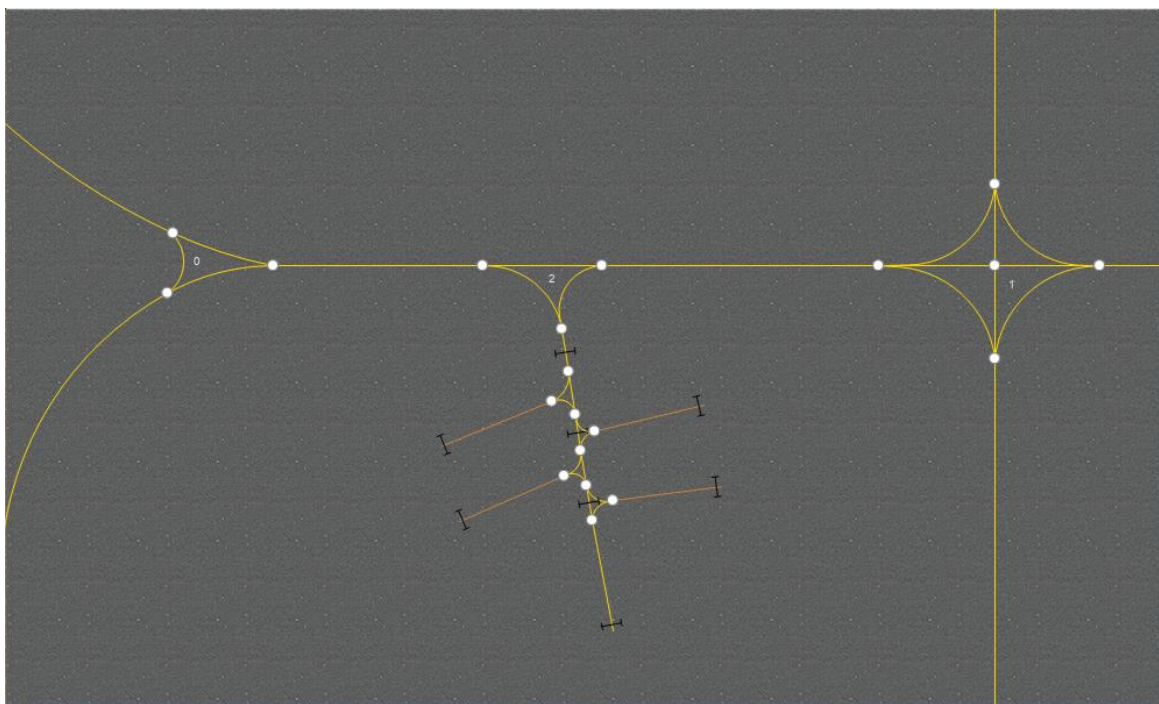
### **3.2.1 Grafická část modelu**

Grafickou částí modelu tvoří fiktivní schéma části letiště, které slouží pro vizuální sledování chování letadel v určitých podmínkách a procesech, které jsou řízeny logickým modelem.

Práce vycházela z infrastruktury letiště, převzata byla hlavní podstata a některé specifické části letiště v omezeném množství.

V grafické části modelu, znázorněném na obrázku 3.2 nalezneme 3 různé křižovatky s odlišně dlouhými segmenty, jak jednosměrné pro konkrétní směr dráhy v používání, tak obousměrné úseky, které reprezentují pojíždění po pojezdových drahách na letišti v Praze, které nesou barvu žlutou. Dále je v modelu červenou barvou vyobrazen záliv s několika stánými, které reprezentují obecný algoritmus navázaný na ŘLP, kde se korigují možnosti zajíždění a vyjíždění ze zálivů a s procesem vyjíždění ze stání, když je ho potřeba.

Grafická část využívá prvky z navolených knihoven, kterými jsou Railway Track v kombinaci s prvkem Switch, za jejich pomoci je utvořena celá síť pojezdových drah. Druhým prvkem je Position on Track, tento prvek byl v infrastruktuře upraven. Již neslouží pro vyznačení mezilehlých vyčkávacích míst ani příček zastavení na osách pojezdových pruhů. Slouží pouze jako příčka při vytlačení ze stání. V předchozích případech byly nahrazeny pomocí switchů, které se pouze posunuly do delší vzdálenosti od křižovatek. Tímto způsobem bylo možné křižovatky a přilehlé segmenty koordinovat pomocí agentů, nikoliv pomocí blokáci a rezervací v infrastruktuře.

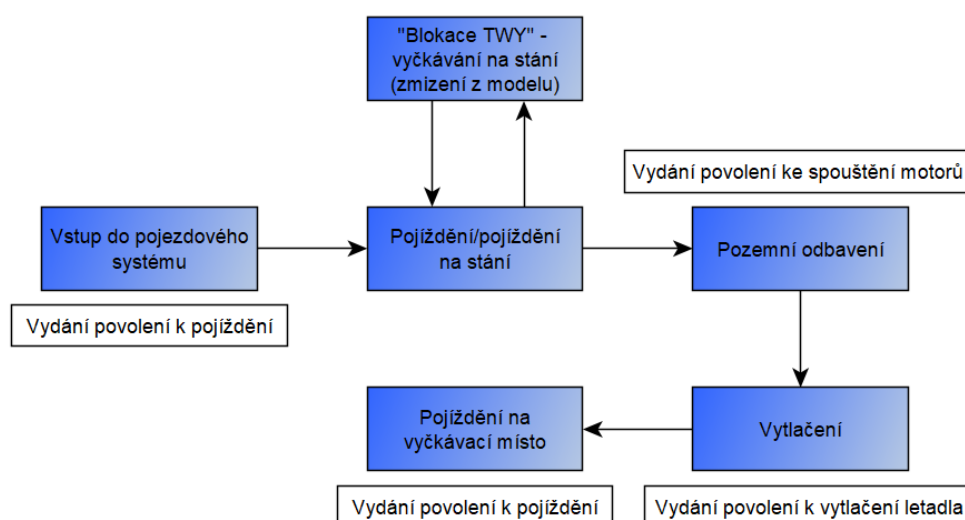


Obrázek 3.2 - Grafická část modelu ze simulačního prostředí AnyLogic

### 3.2.2 Logická část modelu

Logická část modelu má za úkol řízení jednotlivých procesů ATC, které se odehrávají na pražském letišti. Pomocí stavebních bloků byla vytvořena struktura pohybu letadel v modelu. Tato struktura byla vyrobena z knihovny železniční a knihovny modelovacích procesů, které replikují chování letadel na letišti. Pro potřeby komunikace byly vytvořeny populace agentů, které obsahují různé parametry, proměnné, stavové diagramy a funkce pro hladký průjezd a případné předcházení a řešení konfliktních situací v křižovatkách, segmentech, u zálivů a na odbavovací ploše při opouštění stání letadlem se složkou ATC. Hlavním cílem agentů je, aby provoz na letišti fungoval plynule za jakékoliv situace a intenzitě provozu a replikoval procesy reálných situací na letišti.

Na základě prováděné činnosti lze model rozdělit do 6 sekcí. První částí je vstup letadla do systému a tedy na pojezdovou plochu ze dvou až tří možných vstupů, přes které se letadlo pohybuje na stání, nebo dále v infrastruktuře, která již v modelu není znázorněna. Při příjezdu letadla na stání začíná proces odbavení letadla. V případě návazného odletu, začíná proces výjezdem letadla ze zálivu. Na stání u terminálu, kde jsou letadla umístěna typem nose-in začíná vytlačení ze stání až na příčku zastavení, kde probíhají poslední úpravy před začátkem pojíždění. Ve chvíli, kdy je posádka připravena, letadlo si žádá o vstup na pojížděcí plochu. Dále již letadlo pokračuje v pojíždění na vyčkávací místo před dráhou, kdy po cestě komunikuje s jednotlivými řídicími agenty. Těchto 6 procesů je znázorněno na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3 – Stavový diagram obecných procesů

### 3.3 Fungování a princip nově vyvinutého modelu

Práce je řešena na upraveném modelu pomocí simulace části pojezdového systému, který ukazuje řešení vybraných procesů s potenciálními konflikty prostřednictvím implementace řídicích agentů. Agenti plní různé funkce ATC, jedná se o distribuovanou „inteligenci“. Každý agent v modelu řeší lokální možné konflikty, případně je komunikuje s okolními agenty včetně letadel, která jsou též modelována jako agenti.

Pomocí agentů reprezentujících ATC je v modelu řízen celý provoz. Agenti jsou vyhotoveni pomocí populace několika agentů, kteří mají na starosti jednotlivé vybrané úseky zájmu ATC. Tito agenti jsou tři, agent ApronControl, agent SegmentControl a agent CrossingControl. Těmto agentům se hlásí všechna letadla, která se v modelu vyskytují a pohybují. Agenti ATC monitorují letadla po celou dobu jejich působení v modelu. Nicméně neznamená to, že jeden agent reprezentuje jednu službu řízení letového provozu, naopak jedna služba může být rozdělena do několika agentů. Agenti jsou rozděleni podle oblastí jejich zájmu.

Model ATC byl vyvinut pro zlepšení řešení potenciálních kolizí, pro hladký a plynulý provoz letadel v pojezdovém systému a hlavně rozšíření komplexnosti vyvinutého modelu o již zmíněnou složku řízení, tedy ATC a replikování procedur na letišti. Procesy ATC, na které se model zaměřuje jsou - vytlačení ze stání samotných, koordinace letadel v zálivech, kdy tato situace koliduje s dalšími aspekty v rámci pojíždění letadel po pojezdových drahách, řešení samotných křižovatek, řešení průchodnosti segmentů i segmentů obousměrných a řešení odstavení letadel při nepřiděleném stání. Tyto procesy ATC je nutno řešit při jakémkoliv pojíždění danou částí pojezdového systému na stání i ze stání na vyčkávací místo.

Na tomto modelu byly vyzkoušeny vybrané procesy, scénáře a pravidla, která jsou na letišti pro provoz letadel na pohybových plochách zahrnuta s pěti různými intenzitami provozu. Byla vyžadována znalost systémů, které již zmíněný chod letadel na letišti ovlivňují a těmi jsou:

- pravidla řízení letadel po pojezdových plochách
  - odklizení letadla při nepřiděleném stání na konkrétní místo na pojezdové dráze
- doby a pozice vytlačení ze stání
- konfliktnost zálivů při vjíždění a vyjíždění



- obousměrné segmenty
  - kratší a přehlednější segmenty
  - delší konfliktní segmenty
- sektory omezující průchodnost pro letadla převyšující limitní hodnotu rozpětí křídel
- rychlost letadla po jezdových drahách za jednotlivých podmínek

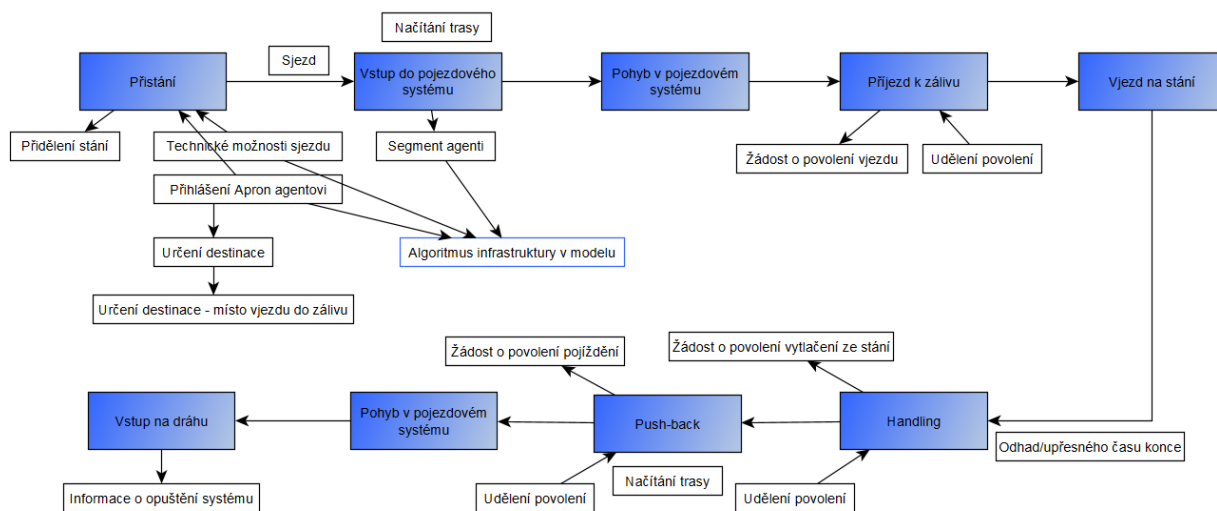
### 3.3.1 Popis modelu

Do modelu vstupují letadla z minimálně dvou a maximálně třech vstupů náhodně, dle nastavené míry intenzity. (V tomto kontextu se jedná o faktická místa v modelu kde vstupuje nebo vystupuje letadlo). Každé letadlo má v sobě náhodně přiděleno, zda se jedná o odlet nebo přilet a cílovou destinaci. Dále zná, zda jede do zálivu a má přidělené konkrétní stání, nebo stání ještě přidělené nemá a musí blokovat část jezdové dráhy nebo modelem pouze projíždí. Dále si letadlo při vstupu do modelu nejprve načte svou trasu po které bude pojíždět a ta je ve většině případů neměnná. Následně probíhá výpočet časů, ve kterých bude vstupovat do všech křižovatek a segmentů a současně časy ve kterých z nich bude vystupovat a směr pojíždění skrz segmenty. Tento princip je zaveden na celé páteřní trase při hladkém průjezdu, kdy letadlo nebude muset dávat žádnému jinému přednost a čas se nebude muset aktualizovat.

Při vstupu letadla do modelu a načtení si své trasy se letadlo přihlásí všem segmentům, které má na své trase a nahlásí jim směr zamýšleného pojíždění, který je již neměnný. Agent Aircraft, tedy samotné letadlo v sobě nese mnoho informací, které jsou důležité pro průjezd částí jezdového systému, ale bez výzvy řídicích agentů jimi neobtěžuje. Jedinou informací, kterou letadlo samo posílá je směr zamýšleného pojíždění. Informace, které v sobě letadlo uchovává jsou:

- směr pojíždění
- předpokládaný čas vstupu do segmentu
- předpokládaný čas výstupu ze segmentu
- předpokládaný čas vstup do křižovatky
- předpokládaný čas výstupu z křižovatky
- přesnou polohu

Průchod letadla celým systémem v modelu je znázorněn na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4 – Algoritmus postupu letadla v modelu

## Segmenty

Letadlo před vstupem do vozidlového systému musí mít garantovaný průjezd prvním segmentem, dále již začíná proces vyhodnocování volnosti průjezdu pomocí agentů. Na základě informací a prvenství přihlášení do segmentu, agent vyhodnotí, zda je průjezd možný a letadlu pošle zprávu s typem ano nebo ne. V momentě, kdy letadlu přijde zpráva kladná, je to pro něj informace, že segmentem může projet. V případě opačném se musí zastavit s dostatečnou vzdáleností, tedy před křižovatkou příslušného, blokováného segmentu. V případě jakéhokoliv zastavení letadla z důvodu konfliktního segmentu před ním, je letadlo nuceno se samo zpětně dotázat zda i předcházející segment není konfliktním a nemůže se využívat obousměrně. Při kladném zjištění je letadlo povinno udělené povolení zamítnout a vrátit se na křižovátku před poslední konfliktní segment. (Nejedná se o fyzické vrácení, stále se povolení načítají s časovou rezervou a tedy letadlo se fyzicky nevrací). Pro zvýšení bezpečnosti v modelu fungují segmenty na základě prvotního přihlášení a v případě potřeby projetí segmentu obousměrně se hodnotí časy příjezdu a výjezdu z daného segmentu. V případě, že se časy lehce překrývají, agent SegmentControl upřednostní čas první, a tedy první časově přihlášené letadlo na daný segment a přihlášené letadlo jako druhé je nuceno v dostatečné vzdálenosti zastavit a chvíli počkat. (Opět se nejedná o zastavení reálné, pouze znázorňuje možné zpomalení letadla). Vše se zde vyhodnocuje s určitým předstihem.

U prvního segmentu jízdy části pojezdového segmentu je vždy garance volného průjezdu a letadlu se načítá trasa tak moc dopředu, dokud jsou segmenty volné. Neřeší se každý segment zvlášť těsně před jeho příjezdem, ale je snaha o povolení, co největší části trasy letadla.

Jakmile letadlo dostane pokyn o blokováném segmentu, tedy příkaz k zastavení, agent si jeho požadavek eviduje a letadlo pouze vyčkává, než dostane zprávu o možnosti opětovného přihlášení se na průjezd požadovaným segmentem. Následující časy výskytu letadla v cestě částí pojezdového systému se automaticky aktualizují a proces dále probíhá totožně.

### **Obousměrné segmenty**

Dalším důležitým prvkem pro simulaci jsou obousměrné úseky. V modelu se vždy nachází jiný počet obousměrných úseků. Možnosti jsou 3 a to zcela bez konfliktního segmentu, s jedním konfliktním segmentem, nebo se dvěma po sobě jdoucími konfliktními segmenty, který je na logiku algoritmu nejnáročnější. Konfliktní segmenty mají znázorňovat úseky při jízdě z/na stání, kde letadla bezpodmínečně potřebují ve všech směrech dráhy v používání využívat dané segmenty obousměrně.

### **Křižovatky**

Současně s agentem SegmentControl kooperuje agent CrossingControl, který má na starosti pohyb v křižovatkách. Tento agent by neměl řešit potenciální konflikty, ty by měly být již vyřešeny. Tento agent pouze na základě kritérií rozhoduje o pořadí průjezdu danou křižovatkou. Totožně jako u segmentů se dané letadlo při načtení své trasy přihlásí na všechny křižovatky, které má ve své trase. U agenta CrossingControl je čas základním rozhodovacím kritériem. Tedy v případě nutnosti řešení přednosti v křižovatkách si agent zažádá letadla o předpokládané časy vjezdu a výjezdu z křižovatky. Na základě času pak každý agent z populace agentů zná časy překrytí příjezdu a výjezdu dvou letadel do křižovatky. Rozhodovací proces se řeší pouze pokud je u každého letadla identifikován jako první. Z důvodů, že u dalších potencionálních střetů může dojít k časové prodlevě, není nutné je s takovým předstihem řešit. Agent CrossingControl tedy řeší pouze přednosti v křižovatkách.

Celý algoritmus tedy prochází několika otázkami. První je, že se agent ptá zda se v křižovatce potkají dvě letadla, pokud ano následuje hodnocení času, konkrétně času přijetí do křižovatky

a času vyjetí z křižovatky. Současně se v tomto bodě zjišťuje zda obě letadla mířící do křižovatky přijíždějí z jiného směru. Pokud ano, pokračuje se v řešení konfliktu, pokud nikoliv, algoritmus zde končí a agent se o letadla dále nezajímá, protože jim nic nebrání v plynulém průjezdu. Stejně je tomu v případě, že letadla přijíždí z jiného směru a časy se jim neprolínají, algoritmus opět končí a přidělený agent se již o tyto letadla nestará. V opačném případě, kdy obě letadla přijedou do křižovatky v čase, který se protíná, nastává posun k další části a tou je vyhodnocení, zda se jedná o letadla, která míří na odlet a nebo opačně o letadla směřující z příletu. V tomto případě je dána přednost letadlu směřující na odlet a letadlo z příletu je plánování trasy dále pozastaveno. Dalším kritériem pro případ, že by nedošlo k rozřešení v předcházejících je kritérium dřívějšího příjezdu ke křižovatce.

## **Apron**

Dalším řídicím agentem je agent ApronControl, který ostatně jako předešní agenti, dostane na počátku cesty letadla modelem zprávu, že k němu směřuje letadlo a zároveň pokud chce může si vyžádat informace o čase příjezdu daného letadla. Podobně jako v předešlých procesech je agent vytvořen jako populace agentů a každý agent má k sobě přidělen svůj záliv u kterého se stará o problematiku možného střetu vyjíždějícího letadla, jak před vytlačení, tak i po vytlačení s letadlem zajištějícím do zálivu, případně s letadlem čekajícím na povolení vjezdu do pojezdového systému.

V případě, že letadlo modelem pouze projíždí se nic dalšího neřeší. Naopak pokud má letadlo přidělené stání proces probíhá následovně. Těsně před zálivem se aktivuje příslušný agent z populace agentů ApronControl a začne proces.

Celý princip závisí na několika po sobě jdoucích otázkách, kdy agent ApronControl zjišťuje situaci v zálivu. Vždy těsně před přijíždějícím letadlem do daného zálivu se přidělený agent táže letadel v zálivu, zda některé letadlo již neprovádí vytlačení ze stání, nebo jiné letadlo nečeká na povolení opuštění ze zálivu, tedy by mohlo blokovat příjezdovou cestu druhému letadlu. V případě, že nikoliv, letadlo jedoucí z příletu má volnou cestu až na své stání. V opačném případě probíhá vyhodnocení pomocí přidružených databází. Řeší se, zda musí být letadlo pozdrženo a musí čekat před zálivem na povolení a tedy dát přednost letadlu vyjíždějícímu ze zálivu, nebo je možnost bezproblémové jízdy až na stání. V případě zdržení proces netrvá nikterak dlouho. Databáze jsou blíže přiblíženy v následující kapitole.

V tomto nově vyvinutém modelu, kdy je modelován pouze jeden záliv s jednou pojezdovou dráhou a tedy menším prostorem mezi stáními, je kromě jednoho případu navolena nemožnost současných vytlačení letadel ze stání. Tedy při vyjíždění jednoho letadla ze stání jsou všechny ostatní, až na jeden případ, evidovány jako kolizní a jsou zablokována. V pomyslném modelu s infrastrukturou Letiště Václava Havla je algoritmus připraven k malým změnám, aby vyhovoval všem zálivům a bylo možné souběžného vyjíždění ze stání.

### **Letadla bez přiděleného stání**

Letadla s nepřiděleným stáním, nebo stále obsazeným stáním se v modelu objeví zcela totožně, jako již bylo popsáno. Pojíždějí směr záliv a těsně před ním z modelu zmizí. Tento postup symbolizuje, že je letadlo odstaveno na pojezdovou dráhu, kde v daný a následující moment není jinému letadlu překážkou v cestě. V případě, kdy se letadlu stání přidělí, opět se objeví na jenom ze vstupů modelu a dále již standardně pojíždí na své stání. V modelu byl zvolen tento přístup z důvodu omezeného množství pojezdových drah.

### **Změna směru**

Dále je zde zavedena možnost změny směru, která replikuje změnu směru pojíždění v návaznosti na změnu směru dráhy v používání. Je zde připraveno tlačítko “changeDirection”, v momentě jeho spuštění se letadla automaticky začnou objevovat z opačného směru. V simulovaném modelu se jedná o pouhou nastavbu, která má představovat reálnou situaci, když se změní směr dráhy v používání. Pro viditelnost v části pojezdového systému je algoritmus nastaven tak, že se počká na vyklizení všech letadel pojíždějících po celé páteřní trase a zajíždějících na stání a pak se teprve směr provozu otočí. Tento princip je pouze přípravou do modelu s širší infrastrukturou Letiště Václava Havla v Praze, protože v běžném provozu se letadla nevyklízejí z celé infrastruktury, jen je potřeba vyšší pozornosti a plánování jízdy letadel. Nicméně v limitaci pojezdového systému v nově vyvinutém modelu k této problematice bylo přistupováno tímto způsobem.

Dále budou všechny zmíněné procesy popsány konkrétně na infrastruktuře pražského letiště formou diskuze. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu obtížného řešení technické stránky programu.

## Databáze

K přehlednějším výpočtům a načítání možností současných procedur v zálivu bylo k agentu ApronControl vytvořeno několik databází.

- All\_push\_backs
- Input\_output\_setup
- Configurations
- Stand\_pb\_options

Tyto jednotlivé databáze slouží k určení vyhodnocení místa stání a s ním možné varianty jednotlivých průjezdů.

U databáze all\_push\_backs se jedná o zohlednění směru výjezdu ze stání, na jakou příčku je možné z konkrétního stání vyjet, jak minimálně dlouhou trasu musí letadlo ze stání vyjet, s jakým dalším současným vytlačení je kompatibilní. Dále je znázorněna podrobná kompatibilitnost v rámci vytlačení ze stání více letadel v jednom zálivu najednou. Zde je možnost pouze jedné kombinace a to indexu stání 0 a 9. Další, co řeší tato databáze jsou slučitelné situace, kdy letadlo čeká na povolení vjezdu do infrastruktury a současně jiné letadlo může začít s procesem vytlačení. Pak je zde znázorněna možná kombinace stání, kam letadlo může zajíždět na stání při současném vytlačení jiného letadla ze stání. Všechny tyto kombinace jsou znázorněny v této databázi.

Databáze input\_output\_setup je tabulka pro náhodné generování vstupů a výstupů pro simulaci.

Databáze configurations navazuje na tabulku input\_output\_setup, kde podrobněji rozepisuje všech 20 možných kombinací.

Databáze stand\_pb\_options se soustředí na 3 push-pozice, které jsou v zálivu nastavené pro možnost vytlačení letadel ze stání. Tato databáze je detekuje a určuje možnou kombinaci zajetí jiného letadla na stání s letadlem čekajícím na povolení k pojíždění.

## 3.4 Bloky

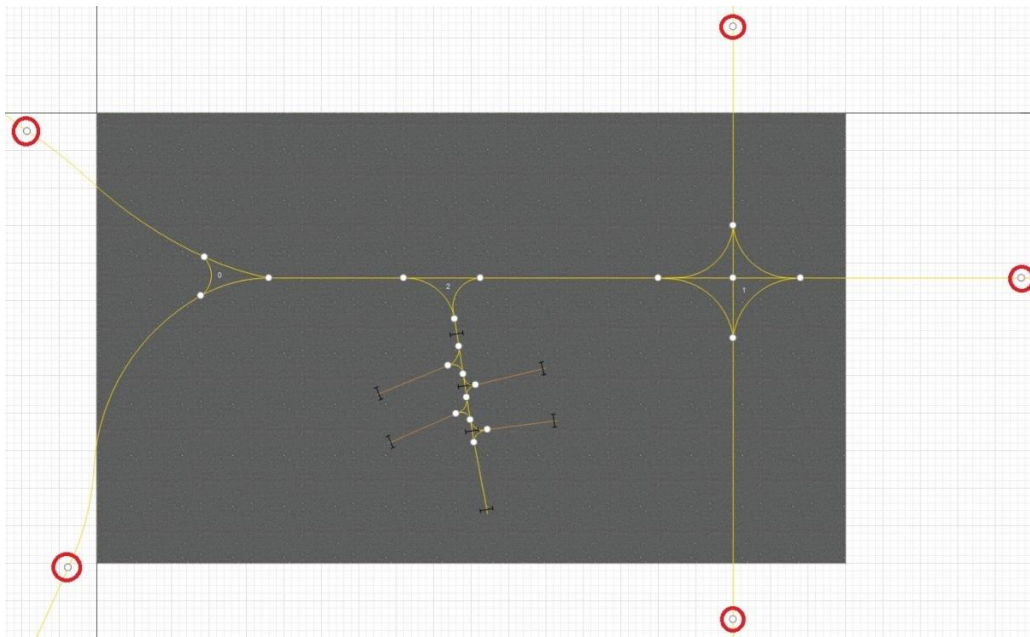
Stavebními komponenty, které se používají k vytváření simulačních modelů jsou označovány jako bloky. Tyto bloky představují různé prvky, které tvoří základ pro simulaci. Každý blok odpovídá specifické funkci nebo entitě v rámci simulace. Pomocí bloků se definují vstupní parametry, používají se k definování logiky, chování a interakcí simulace.

### 3.4.1 Source

V AnyLogic je blok Source základním stavebním blokem používaným v modelech simulace. Představuje bod, ve kterém hlavní entity vstupují do simulace, znázorněny na obrázku 3.5. Tento blok generuje a zavádí nové entity do simulace zadanou rychlostí nebo podle definovaného vzoru. Tyto entity pak procházejí simulací a interagují s dalšími bloky a procesy.

Generování agentů je možné nastavit několika způsoby, pro tuto práci byla vybrána metoda fiktivních letadel, která se upravuje pomocí nastavení míry intenzity provozu. Pomocí funkce ‘‘Calls of inject function‘‘ je možné nastavit exponenciálně rozložený čas příjezdu letadel do modelu a tím korigovat hustotu provozu. V modelu je postupně nastaveno a vyzkoušeno 5 různých intenzit hustoty provozu, které určují, po jak dlouhých intervalech se letadla v modelu vyskytnou a tím simulují různé míry vytíženosti letištní plochy, od slabé po velice silnou.

Tento blok je ve vytvořeném modelu využit pro generování vstupu letadel na dvou až třech předem vytyčených místech pojezdového systému (generování je náhodné). Tento vstup letadla je reprezentován pouze nahráním jeho cesty a jednotlivých propozic, ale zatím nám letadlo nevstupuje do modelu fyzicky. Vstup prvního letadla je nastaven hned po vzniku modelu. Dalším parametrem, který se zde nastavuje, je intenzita hustoty provozu, tedy přesný počet letadel, který se v modelu objeví za hodinu.



Obrázek 3.5 - Vytyčení možných vstupů a výstupů, které se generují náhodně

### 3.4.2 MoveTo

Blok MoveTo se primárně využívá k modelování pohybu entit z jednoho místa na druhé v rámci simulačního prostředí. Tento blok umožňuje definovat cesty, trasy a charakteristiky pohybu pro entity, připouští simulovat, jak se tyto entity pohybují buď vpřed nebo vzad.

Dalším funkcí bloku je definování segmentů na cestě do cíle, respektive jakým způsobem k danému cíli dojede. V tomto modelu je trasa hledána a volena automaticky. Blok má na začátku definované cesty, tedy segmenty, po kterých má do zadaného cíle jet. V tomto vytvořeném modelu je pouze jedna cesta, která je prezentována jako trasa páteřní, po které jezdí většina letadel, přibližně 80 % ze všech generovaných. Dalším důležitým prvkem, který se zde nastavuje, je rychlost daného agenta. Rychlost je zapsána pomocí trojúhelníkového rozdělení, aby každé letadlo mohlo jet odlišnou rychlostí, které se generuje náhodně z daného intervalu, který je stanoven 22 km/hod až 26 km/hod.

V případě nepřiděleného stání v době objevení se letadla v modelu sjede letadlo automaticky na pomyslnou odstavnou dráhu a v modelu se tento jev bude prezentovat zmizením letadla. V okamžiku, kdy mu bude stání přiděleno, se opět objeví na vstupním bodě a bude dále pokračovat v jízdě na stání.



Blok MoveTo se v modelu využívá při pojíždění infrastrukturou, tedy na stání i jen na samotný průjezd, k odletu, nebo z jakéhokoliv jiného důvodu k pojíždění po pojezdových drahách. V tomto případě se jedná o pojíždění dopředu. V druhém případě je tento blok využíván při vytlačení letadla ze stání a jedná se tedy o pohyb zpáteční.

### **3.4.3 SelectOutput**

Blok Select Output se užívá k řízení směrování entit na základě určitých podmínek. Tento blok se obvykle používá, když se entita v simulaci potřebuje rozhodnout, kterou cestu nebo proces bude následovat, v závislosti na konkrétních attributech nebo podmínkách. Umožňuje definovat více výstupních cest nebo větví a nasměruje příchozí entitu na příslušný výstup na základě nastavených podmínek.

V modelu se tento blok využívá při rozhodování, kdy daný let nemá navazující odlet a na letišti zůstává, nebo v případě, že nevyužije daný záliv v modelu a pojíždí na odlet, nebo na jiný záliv, který již v modelu není znázorněn. V tomto případě z modelu mizí. Dále se tento blok v modelu využívá pro volbu zda letadlo má, nebo nemá přidělené stání.

### **3.4.4 TrainEnter**

Blok TrainEnter slouží pro fyzický vstup letadla do modelu. V tomto bloku si letadlo načítá svou již určenou trasu na základě zakázaných zón a současně se nahlásí všem agentům z populace SegmentControl, které má po cestě.

### **3.4.5 Delay**

Blok Delay se používá k zavedení časového zpoždění do toku entit v rámci modelu simulace. Tento blok se běžně používá k reprezentaci procesů, jejichž dokončení trvá určitou dobu, nebo k simulaci čekacích dob v systému.

Blok Delay má v modelu dvě funkce. První je po předem stanovený čas agenty pozdržet. Druhou funkcí je shromáždění letadel v bloku, které nemají povolení k danému úkonu. Tyto bloky se v modelu využívají při procesu pozemního odbavení, zde se jedná o funkci první. Varianta druhá je v modelu využita v případě čekání na přidělení stání. V momentě, kdy

letadlo z jakéhokoliv důvodu čeká na push-back, nebo v případě chvilkového zdržení, kdy letadlo dává přednost jinému letadlu.

Agent se z tohoto bloku dostane pomocí dvou možností, obě možnosti jsou v modelu využity. První je uplynutí určité doby, která je generována pomocí trojúhelníkového rozdělení, které se volí náhodně z předvoleného intervalu a pokaždé se tedy jedná o jinak dlouhý časový úsek. Druhou možností je zavoláním funkce stopDelay, která je navázána na jinou událost v modelu a při jejím spuštění je tedy agent z bloku delay uvolněn.

### 3.4.6 Dispose

Blok Dispose je prvek, který se používá k odstranění entit ze simulace poté, co dokončily své procesy. Tento blok se používá k reprezentaci výstupních bodů nebo cílů, kde entity opouštějí prostředí simulace.

Blok Dispose je zde využit k zakončení celého postupu jízdy letadel až do samotného zmizení agenta. Ke zmizení agenta v modelu dochází v momentě zjetí na zvolené stání, v případě, že tam jeho cesta končí při přiletu a nemá navazující odlet. Další možností je, že letadlo nejede do znázorněného zálivu, ale pokračuje na jiný, nebo jede na odlet. V neposlední řadě je tento blok využit při nepřiděleném stání v momentě, kdy se letadlo v modelu vyskytne. V tomto nastíněném případě letadlo z modelu zmizí, aby neblokovalo jedinou příjezdovou cestu, ale pomyslně blokuje jinou pojezdovou dráhu. V momentě, kdy letadlo bude mít přidělené stání, rozjede se z blokované dráhy, která v modelu není znázorněna a letadlo se opět objeví na vstupu modelu.

## 3.4 Agenti a populace agentů

V této práci jsou agenti stěžejním prvkem celého modelu. Každý vytvořený agent má navolené určité parametry, které pomocí funkcí a proměnných pomáhají k vytvoření jeho působení v modelu. Agenti se ve využitém prostředí nachází v rámci konceptu populace, což označuje množinu entit stejného typu. V modelu je tímto typem ztvárněna majorita všech agentů včetně agentů řídicích. Mezi ně patří agent SegmentControl, agent CrossingControl a agent ApronControl. Tyto agenti slouží k simulování práce ATC a dále dozorují nad hladkým průjezdem všech navolených procesů. Všechny tři agenti, kteří tvoří řídicí složku jsou nasimulováni jako populace agentů a mají na starosti dílčí úkon celého procesu. Agent

Aircraft představuje samotné letadlo, ale v rámci funkcí, které má v sobě ho lze částečně považovat za součást ATC. Níže je uveden krátký popis všech použitých agentů.

### **3.5.1 Main**

Jedná se o předem navoleného agenta, který tvoří základ samotného AnyLogicu již při vytvoření prázdného modelu. V tomto agentovi se nachází grafická část a bloková část vycházející z logické části, která je vytvořená pomocí bloků, funkcí, proměnných a kolekcí vztahujících se k dané infrastruktuře.

### **3.5.2 Aircraft**

Agent Aircraft je jako jediný vzatý z knihovny železnice a v této terminologii představuje Train jako takový. Jedná se o agenta, který prezentuje celý vlak. Jeden vůz z celého vlaku pak prezentuje agent Animation, kterému bude věnována pozornost dále. V modelu se v agentu Aircraft nachází parametry letadla, které se náhodně generují ke každému letadlu. Dále se zde nachází několik parametrů a proměnných, které slouží pro kontrolu pozice letadla, načítání trasy a směru jízdy, generování času průjezdu jednotlivými částmi pojezdového systému, kontrolu vytažení letadla ze stání a ke komunikaci s ATC, tedy agenty vytvořenými pro řízení. Tento agent lze být v modelu brán jako menší součást ATC, tedy řídicího agenta. Nejen, že reprezentuje samotné letadlo a komunikaci mezi agenty ATC a pilotem, ale dále poskytuje parametry ostatním agentům, své fyzické, ale i informace o poloze rychlosti, času, směru jízdy, tedy parametry, které jsou typicky záležitostí ATC. Dále všechny žádosti a povolení vycházejí prostřednictvím agenta Aircraft v závislosti na jeho poloze a stavu v části pojezdového systému.

### **3.5.3 Animation**

Agent Animation ztotožňuje vizuální podobu letadla, která se promítá v grafické části modelu a je s ní zde pohybováno. Znázorňuje jeden vůz z celého vlaku a tím je jedno letadlo.

### 3.5.4 ApronControl

Agent ApronControl představuje v modelu agenta pro hlídání vyjíždění a zajiždění z a do zálivů, aby se předešlo potencionálním konfliktům. V modelu představuje jeden z mnoha procesů, které na letišti musí řešit ATC.

Myšlenka tohoto agenta je zhotovení pomocí populace agentů tak, aby každý agent z populace měl na starosti jeden záliv, u kterého řeší jeho plynulý provoz. Algoritmus je založen na udělení povolení, konkrétně pro vstup do zálivu jsou zapotřebí dvě. Prvním povolením je průjezd posledním segmentem před zálivem a druhé povolení se týká samotného vstupu do zálivu. Povolení vstupu do zálivu se odvíjí od třech po sobě jdoucích otázek, na které hledá agent ApronControl odpověď. V této části pojezdového systému jsou nastaveny následovně. Jako první agent oslovuje letadla připravená na odjezd, tedy letadla po vytlačení ze stání a čekající na povolení k pojíždění. V druhé řadě jsou dotazována letadla čekající na vstup do zálivu. A jako poslední se prošetřují letadla na stání, zda některé z nich nevyžaduje procesu vytlačení. Tento postup otázek se neustále opakuje a byl zvolen z důvodu, aby nedošlo k zatarasení jediné páteřní pojezdové trasy, která se v modelu nachází, ale také k tomu, aby letadla měla volnou příjezdovou cestu ke konkrétním stáním.

Jediný agent ApronControl má ke svému vyhodnocení připojené databáze, které mu pomáhají vyhodnotit konkrétní stání, kde se letadlo nachází, směr vyjíždění, zvolenou push-pozici na kterou právě vyjíždí, délku potřebnou pro couvání a všechny varianty, kdy je možné provádět současné vytlačení ze stání vícero letadel najednou. Tato databáze pomáhá agentu ApronControl k rychlejšímu a přesnějšímu rozhodování.

V agentu ApronControl se nachází několik funkcí, které zprostředkovávají celou logiku agenta. K nim jsou nastaveny pomocné kolekce, kam se letadla tzv. třídí při dílčích úkonech daných procesů.

### 3.5.5 CrossingControl

Agent CrossingControl představuje část agenta ATC v reálném prostředí. Jedná se o nadřazeného agenta pro všechny křižovatky v celém modelu. Myšlenka tohoto agenta je velice podobná agentu SegmentControl a ApronControl, kdy je opět jednomu agentu z populace přiřazena jedna křižovatka, na kterou dohlíží s tím rozdílem, že již neřeší žádné

konflikty, ani potenciální. Pro agenta je nejdůležitější předpokládaný čas příjezdu a výjezdu letadla křižovatkou. Tuto informaci v sobě nese agent Aircraft a v momentě, kdy hrozí přijetí více letadel do křižovatky najednou, si agent CrossingControl o tuto informaci zažádá. Dle této základní informace agent přesně ví, zda bude muset řešit nějaké přednosti či nikoliv. Pokud se ve stejný čas intervaly vjezdu a výjezdu dvěma letadlům překrývají, v ten moment agent CrossingControl zahájí rozhodovací proces. V křižovatkách je reprezentován pohyb na základě určitých pravidel. Vzhledem k části pojezdového systému jsou kritéria dvě a jsou nastavena na základě upřednostnění odletu před příletem a druhým kritériem je první přihlášení, tedy i samotný příjezd do křižovatky. Další navržená kritéria byla vyzkoušena, ale v nastaveném konceptu jsou nerelevantní.

V agentu CrossingControl jsou vytvořené funkce, které pomáhají v procesu rozhodování. Dále se zde nacházejí kolekce, kam se přesouvají letadla při určitých postupech, při přiblížení, při dávání přednosti a v případě, když jsou blokována.

Agent CrossingControl je již z velké části předpřipraven pro rozsáhlejší využití pro případný model celé infrastruktury Václava Havla.

### **3.5.6 SegmentControl**

Agent SegmentControl byl vytvořen pro lepší průjezd infrastrukturou a konkrétními segmenty, zvláště těch, které jsou pro jakýkoliv směr dráhy využívány jako segmenty obousměrné. Tento agent koordinuje průjezd jednotlivými segmenty a hlídá, aby se nestalo, že v jeden okamžik by v jednom segmentu jela letadla opačných směrů a nebylo by možnosti vyhnout se. Každý segment je ohraničen okrajovým switchem a přiléhajícím trackem směrem dovnitř, které slouží k tomu, aby jak agent, tak přijíždějící letadlo přesně vědělo o který segment se jedná. V případě přijíždějícího letadla do volného segmentu, nebo segmentu, kde jede letadlo ve stejném směru nebude právě nahlašované letadlo pozdrženo a bude mu umožněn volný průjezd, protože mu v cestě nic nebrání. V opačném případě si segment před nahlašujícím se letadlem stihlo zarezervovat letadlo jiné, které pojíždí z druhého směru, tedy letadlo právě se nahlašující na segment bude pozdrženo ještě před křižovatkou, dokud letadla neopustí segment.

Pro lepší přehlednost je v modelu nastaveno několik funkcí, kolekcí a proměnných, kam se letadla při určité problematice: povolení průjezdu, nepovolení průjezdu, blokace, opětovné změny povolení a možných dalších úkonech selektují.

### **3.5.7 VirtualQueueElement**

Agent VirtualQueueElement byl vytvořen jako pomocný agent k tvoření front a při zdržení letadla vjezdu do křižovatky. Jedná se o moment, kdy se letadlo blíží k dalšímu letadlu a místo, aby do něj narazilo, narazí do pomyslné bariéry, kterou reprezentuje tento agent. Totožně je tomu v případě chvilkového zastavení letadla v modelu u křižovatky. Tímto způsobem jsou řešeny všechna zastavení letadel v modelu. Dále letadlům pomáhá v přesně stanovenou dobu se po zastavení opět rozjet. Přesná doba je reflektována zmizením pomyslné bariéry, kterou opět znázorňuje tento agent.

## **3.6 Provozní procesy**

Byly vybrány 4 provozní procesy, které v reálné situaci spadají do kompetence ATC, nebo na ATC mají úzkou návaznost. Simulace procesů byla prováděna na pěti náhodnostech. Pro každý proces bylo navrženo několik variant možností řešení a provedení algoritmu, které jsou detailně popsány v jednotlivých procesech v nadcházejících kapitolách.

### **3.6.1 První proces – změna směru pojiždění**

Prvním procesem je řešení změny směru pojiždění letadel po pojezdových drahách. Na změnu směru pojiždění letadel má úzký vliv změna směru dráhy v používání. Tato změna úzce souvisí s volbou pojezdových drah na stání a opačně i na vyčkávací místo u RWY. Tento proces byl vybrán z důvodu většího tlaku při vyšším provozu na řídicí v letovém provozu.

V rámci reálné situace na letišti Václava Havla v Praze tento úkon ovlivňuje nejvíce počasí. V případě, kdy ATC sezná potřebu změny směru dráhy v používání, řídicí na věži mají před sebou náročnější situaci na řízení letadel, ale nikoliv nereálnou. Ačkoliv pro řídicí v letovém provozu je lepší, když ke změně směru dráhy v používání dochází při nižší intenzitě hustoty provozu, není tomu tak vždy i v reálném prostředí. Změna směru dráhy v používání je určitý čas dopředu naplánována, plánuje se poslední letadlo, které přistane v původním směru dráhy. V okamžiku, kdy přistává poslední letadlo v původním směru dráhy v používání, může ATC

nechat pojíždět letadla na nový směr dráhy, který ještě není využíván. Pro ATC to není problém, jen musí být více ostražít a na opuštění posledního letadla z dráhy v původním směru používání musí nechat volný jeden sjezd, pro zjednodušení ten zcela poslední, ale není to žádným pravidlem.

Nově vytvořený model možností změny směru pojíždění disponuje, avšak vzhledem k omezené části pojezdového systému, kde se jedná pouze o jednu páteřní pojezdovou cestu a algoritmu, který může pouze změnit vstupy na výstupy a opačně, není reálné vyhodnotit původní zamýšlenou problematiku. V systému se změni směr pojíždění, ale nelze vyhodnotit větší zpomalení letadel a delší čas strávený v pojezdovém systému, který byl predikován. Lze pouze vyhodnotit zmíněné faktory, avšak pouze ve srovnání obvyklé jízdy letadel v pojezdovém systému s různými intenzitami hustoty provozu, nikoliv v závislosti na změně dráhy v používání. Tato funkce je připravena do budoucna pro širší implementaci do modelu na Letiště Václava Havla, kde se předpokládá zajímavějších výsledků.

### **3.6.2 Druhý proces – obousměrné, konfliktní segmenty**

Proces konfliktních segmentů je asi jedním z nejrizikovějších, řídicí si musí dávat velký pozor, aby nikdy nedošlo k výskytu protijedoucích letadel s nemožností se sobě vyhnout. Jedná se o segmenty po kterých se jezdí ve všech směrech dráhy v používání obousměrně. Na letišti jsou ke každému směru dráhy v používání, pokud je tak možné učinit, přítomny dva typy úseků z hlediska využití. Určité úseky se častěji užívají pro průjezd pouze jedním směrem a jiné úseky jsou využity v obou směrech dráhy obousměrně.

V nově vytvořeném modelu byla snaha o přiblížení těmto možným scénářům. Byly zavedeny tři varianty možného pojíždění. První varianta byla, že letadla pojíždějí úsekem bez jakéhokoliv konfliktního segmentu, druhá varianta byla s jedním konfliktním segmentem a třetí varianta byla s dvěma po sobě jdoucími konfliktními segmenty.

Podrobné výsledky jsou zpracovány v kapitole 3.7.

### **3.6.3 Třetí proces – křižovatky**

Proces křižovatek byl v modelu vyzkoušen, jednalo se o zkoušku hladké průjezdnosti a porovnání výhod každé metody.

Vybrané metody byly dvě, konkrétně metoda směřování segmentů a metoda sloučení křižovatek. Metoda sloučení křižovatek byla již zavedena v původním modelu, kde letištní infrastruktura na letišti v Praze k tomu svou grafickou podobou vybízí. Působí tak, že se několik křižovatek prolíná do jedné. Tato metoda byla vyhodnocena jako bezpečná, avšak při delších úsecích neefektivní, docházelo k většímu zdržení z důvodu nemožnosti průchodu více letadel do různých směrů, tedy propustnost infrastruktury se zmenšovala a provoz nebyl plynulý. U kratších úseků se pravidlo nepotvrdilo.

V případě, že se jedná o krátký segment a křižovatky jsou velice blízko u sebe je zvoleno řešení spojení dvou křižovatek do jedné jako výhodné. Tedy infrastruktura je již připravena tak, že když se letadlo táže na segment, který je propojen s křižovatkou a následujícím segmentem, tak letadlo dostává povolení průjezdu celou spojenou částí a má zaručené, že se v daném úseku s žádným jiným letadlem nestřetne.

V opačném případě, kdy je segment delší, je zaveden algoritmus směřován segmentů, kdy si letadlo žádá o povolení až do konce inkriminované části, případně až na stání, pokud se jedná o koncový segment. Tato varianta byla v delších úsecích rychlejší a taktéž bezpečná, protože jiné letadlo jedoucí jiným směrem do dané části vjet nesmělo a v infrastruktuře se netvořily dlouhé a zdrženlivé fronty.

Toto řešení bylo v modelu pouze vyzkoušeno a je připraveno pro implementaci do modelu s infrastrukturou letiště v Praze v rozsáhlejší podobě. Na části pojezdového systému toto řešení pozbývalo smysl, proto je pouze předpřipraveno a aktivně se nevyužívá.

### **3.6.4 Čtvrtý proces – zálivy**

Čtvrtý proces je zaměřen na řešení problematiky při vytlačování letadel ze zálivu a současné koordinaci letadel jedoucích z příletu do zálivu a letadel čekajících na povolení k opuštění zálivu.

Původně byl model nastaven, tak že mělo vždy přednost vyjíždějící letadlo i když začalo s vytlačováním až po přihlášení vjíždějícího letadla do segmentu. V modelu byl tento koncept vyzkoušen, nicméně i při kratší době čekání se letadly blokovala páteřní trasa a začaly se tvořit dlouhé fronty na místech, kde by se pravidelně tvořit neměly i při nejnižší možné intenzitě provozu. Tato nasimulovaná část pojezdového systému je z hlediska zálivů



podřízena snaze o co nejbližší přiblížení plynulosti reálné situaci a tedy jakmile agent ApronControl vyhodnotí možnost bezkonfliktního zajištění příjíždějícího letadla na příslušné stání, učiní tak a letadlu vydá povolení, i kdyby mělo druhé letadlo s procesem vytlačení chvíli počkat (zdržení není nikterak velké). Tento scénář je zde zahrnut, protože na letišti Václava Havla je koordinace vytlačení letadel ze stání v kompetenci ATC.

V případě Letiště Václava Havla se jedná o dynamické řešení. Řídící letového provozu si letadlo odstaví v případě své potřeby, s ohledem na skutečnost, že letadlo nemá přidělené stání. Řídící letového provozu dopředu vědí, zda se bude jednat o delší čekání z důvodu plného stání, nebo o krátké zdržení, kdy letadlo dává pouze přednost vyjíždějícímu, nebo jinému letadlu zajiždějícímu do stejného zálivu. Při delším čekání si řídící letového provozu vyčlení jednu pojezdovou dráhu, kde pro jejich potřeby letadlo neovlivní provoz pojížděcích letadel, případně při delším čekání mohou požádat CDP o odklizení na průjezdné stání. V opačném případě, kdy se jedná o krátký časový úsek, letadla vyčkávají těsně před zálivem, tak aby opět nebránily v plynulém provozu ostatních letadel.

### 3.7 Výstupní hodnoty

Po ukončení simulace model zobrazí několik hodnot a informací k jednotlivým scénářům, které zahrnují počet konfliktních segmentů v několika intenzitách. Sledovaných intenzit bylo zvoleno 5. Nejnižší intenzitou provozu je vstupujících 10 letadel/hod., nízkou intenzitu provozu odráží 20 letadel/hod., střední intenzita provozu činí 30 letadel/hod., vysoká intenzita provozu značí 40 letadel/hod. na vstupu a pro nejvyšší intenzitu provozu bylo zvoleno 50-55 letadel/hod. Vyšší intenzita letadel byla pro takto malou infrastrukturu zavádějící. Sledovaná data pro každou možnost náhodností (1-20) jsou:

- Průměrný čas zdržení v zálivu
- Průměrný čas průjezdu letadla infrastrukturou
- Průměrný čas letadel jedoucích z příletu
- Průměrný čas letadel jedoucích na odlet
- Průměrný počet udělených povolení na letadlo

Data jsou sledována pro konkrétní počet konfliktních segmentů. První dva scénáře jsou bez konfliktního segmentu, tedy hladký průjezd infrastrukturou. Scénář 3 až 8 jsou všechny

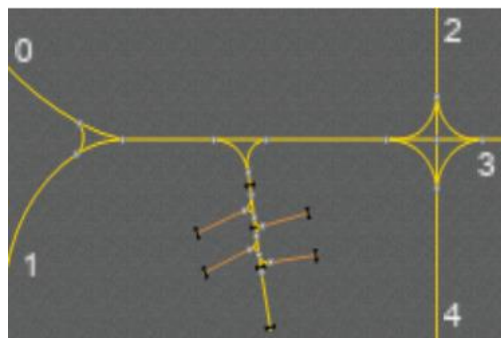
varianty náhodností pro scénáře s jedním konfliktním segmentem. Scénáře se dvěma konfliktními segmenty jsou pak znázorněny variantami scénářů 9 až 20. Tyto scénáře byly simulovány v pěti náhodnostech a v pěti intenzitách hustoty provozu.

### Simulované scénáře

Scénář 1-2 – První skupina scénářů obsahuje pouze dva z důvodu, že se jedná o simulaci bezkonfliktního segmentu a aby letadlo projelo inkriminovanou částí musí být na obrázku 3.6, tedy vstupy/výstupy 0 a 1 a na druhé straně 2, 3, 4 vždy totožně vstupem, nebo výstupem. Výsledné scénáře pak vyjdou na počet dva.

Scénáře 3-8 – Druhá skupina scénářů skýtá scénářů šest z důvodu počtu kombinací. Jedná se o scénáře s jedním konfliktním segmentem. A možné kombinace, kdy je potřeba, aby na levé straně, na obrázku 3.6, tedy vstup/výstup 0 a 1 byl vždy totožně vstupem, nebo výstupem. K této kombinaci pak lze vždy přidat jeden vstup/výstup z druhé strany, tedy jednou to bude 2, podruhé 3 a na závěr 4. Pokud je splněno toto pravidlo výsledný počet možných scénářů vyjde šest.

Scénáře 9-20 – Třetí skupina scénářů pojímá dvanáct scénářů a důvodem je simulování scénářů se dvěma konfliktními segmenty. V tomto případě jsou možné kombinace libovolné a ve výsledném součtu jich vyjde dvanáct.



Obrázek 3.6 - Rozkreslené možnosti kombinací scénářů

### Průměrný čas zdržení v zálivu

Je vyjádřen porovnáním časů zdržení, do kterých byly zahrnuty časy čekání na povolení k vytlačení ze stání a časy povolení k pojíždění, od doby zažádání letadlem. Součet těchto časů a jeho následné zprůměrování ve všech jednotlivých scénářích, kterým náleží konkrétní

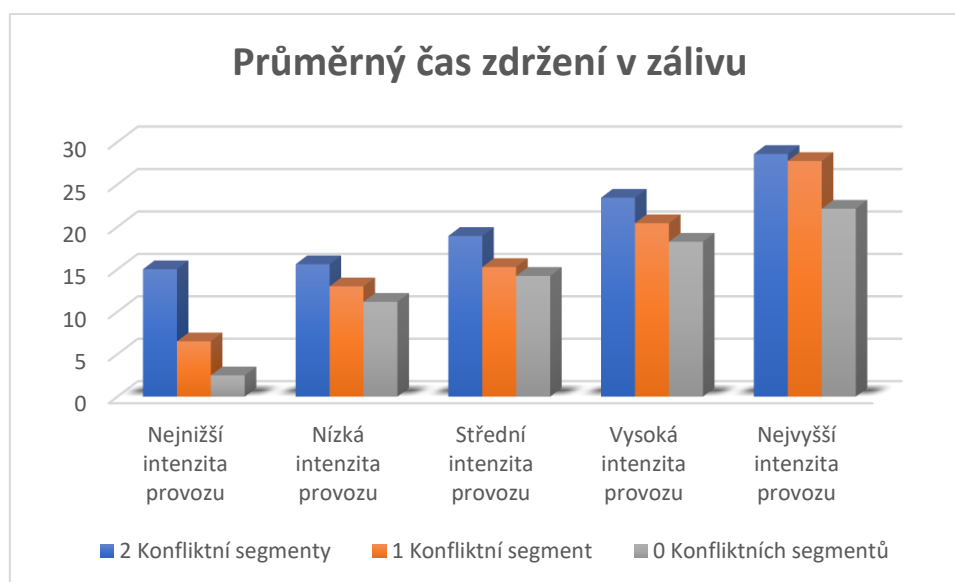
počet konfliktních segmentů byl zpracován a jeho výsledné hodnoty s příslušnou odchylkou jsou uvedené v tabulce 3.1.

Segmenty/ Hustota provozu	Nejnižší intenzita provozu	Nízká intenzita provozu	Střední intenzita provozu	Vysoká intenzita provozu	Nejvyšší intenzita provozu
<b>2 konfliktní segmenty</b>	15 s (±1,13)	15,59 s (±1,35)	18,93 s (±1,76)	23,43 s (±2,54)	28,59 s (±2,56)
<b>1 konfliktní segment</b>	6,5 s (±0,28)	12,98 s (±0,93)	15,26 s (±1,42)	20,42 s (±1,71)	27,75 s (±2,32)
<b>0 konfliktních segmentů</b>	2,50 s (±0,08)	11,16 s (±0,85)	14,21 s (±1,39)	18,24 s (±1,78)	22,13 s (±2,08)

Tabulka 3.1 – Průměrný čas zdržení v zálivu

V grafu 3.7 se nachází na ose „x” pět intenzit hustoty provozu, od nejnižší (10 letadel/hod.) po nejvyšší intenzitu provozu (50-55 letadel/hod.). Osa „y” obsahuje konkrétní průměrný čas zdržení letadla v zálivu. Časy v histogramu jsou uvedeny v sekundách.

Z výsledků je patrné, že doba zdržení zálivů se konstantně zvyšovala s narůstajícím počtem konfliktních segmentů a s navyšující se intenzitou.



Obrázek 3.7 – Graf – Histogram průměrných časů zdržení v zálivu se zvyšující se intenzitou

### Průměrný čas průjezdu letadla pojezdového systému

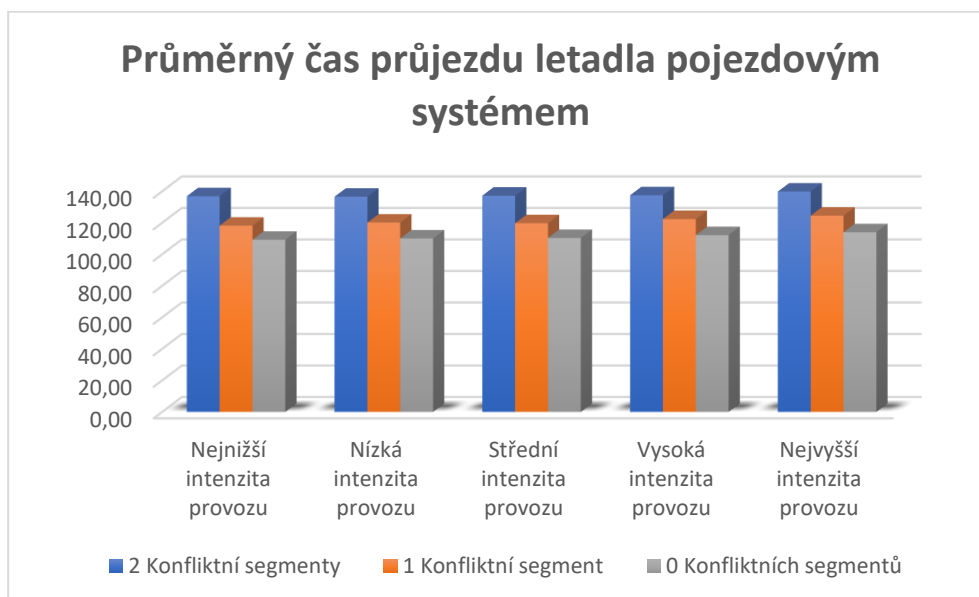
Na základě porovnání a výpočtu průměrných časů celkové strávené doby letadel pojezdovém systému jsou uvedené v tabulce 3.2. Opět se jedná o data z pěti intenzit, které byly rozčleněny do jednotlivých scénářů na základě počtu konfliktních segmentů.

Segmenty/ Hustota provozu	Nejnižší intenzita provozu	Nízká intenzita provozu	Střední intenzita provozu	Vysoká intenzita provozu	Nejvyšší intenzita provozu
<b>2 konfliktní segmenty</b>	136,86 s (±2,19)	136,54 s (±2,64)	137,21 s (±2,78)	137,49 s (±2,93)	139,80 s (±3,36)
<b>1 konfliktní segment</b>	118,18 s (±2,26)	120,12 s (±1,48)	119,73 s (±1,39)	122,37 s (±2,14)	124,55 s (±1,65)
<b>0 konfliktních segmentů</b>	109,24 s (±0,54)	110,08 s (±0,22)	110,38 s (±0,71)	112,17 s (±1,45)	114,01 s (±0,28)

Tabulka 3.2 - Průměrný čas průjezdu letadla pojezdového systému

Histogram 3.8 znázorňuje na ose „x” pět intenzit hustoty provozu, od nejnižší (10 letadel/hod.) po nejvyšší intenzitu provozu (50-55 letadel/hod.). Osa „y” obsahuje konkrétní průměrný čas průjezdu letadel celou infrastrukturou. Časy v histogramu jsou uvedeny v sekundách.

Z grafu je patrné, že při zvyšujícím se počtu konfliktních segmentů narůstá i čas doby strávené v pojezdovém systému. Tento jev může být zapříčiněn častějším vyčkáváním na volný segment. Se zvyšující se intenzitou dochází i k mírnému nárůstu času, avšak v tomto grafu je trend zvyšování nevýrazný.



Obrázek 3.8 – Graf – Histogram průměrných časů průjezdu letadla pojezdovým systémem

### Průměrný čas letadel jedoucích z přiletu

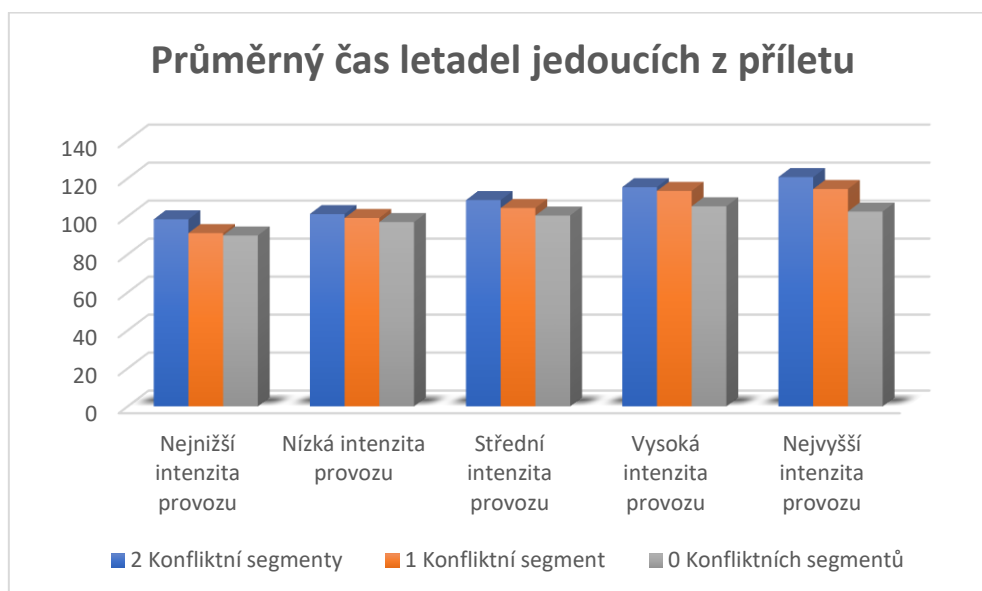
V tabulce 3.3 jsou uvedeny hodnoty času letadel ze vstupu do modelu až na přidělené stání (včetně průjezdu zálivem). Časy byly porovnány v pěti intenzitách s rozdělením na základě počtu konfliktních segmentů do 20 scénářů.

Segmenty/ Hustota provozu	Nejnižší intenzita provozu	Nízká intenzita provozu	Střední intenzita provozu	Vysoká intenzita provozu	Nejvyšší intenzita provozu
<b>2 konfliktní segmenty</b>	98,46 s (±4,14)	101,23 s (±5,01)	108,58 s (±4,12)	115,39 s (±3,96)	120,68 s (±4,37)
<b>1 konfliktní segment</b>	91,17 s (±3,52)	99,15 s (±3,36)	104,43 s (±3,54)	113,40 s (±3,49)	114,39 s (±3,75)
<b>0 konfliktních segmentů</b>	89,94 s (±2,17)	96,99 s (±2,57)	100,44 s (±3,43)	105,31 s (±2,68)	102,55 s (±3,11)

Tabulka 3.3 - Průměrný čas průjezdu letadla infrastrukturou ve směru přilétajících letadel

Histogram 3.9 znázorňuje na ose „x” pět intenzit hustoty provozu, od nejnižší (10 letadel/hod.) po nejvyšší intenzitu provozu (50-55 letadel/hod.). Osa „y” obsahuje konkrétní průměrný čas průjezdu letadel celou infrastrukturou. Histogram zahrnuje letadla jedoucí na stání i letadla pouze projíždějící s přiřazeným kritériem přilet. Časy v histogramu jsou uvedeny v sekundách.

Výsledky ukazují obdobně jako v předcházejícím grafu, že s narůstajícím počtem konfliktních segmentů se strávená doba v infrastruktuře prodlužuje. Nárůst času je zde výraznější než tomu bylo v předchozím parametru, tento trend pak platí pro všechny varianty scénářů při většině hustot provozu.



Obrázek 3.9 – Graf – Histogram průměrných časů přilétajících letadel

### Průměrný čas letadel jedoucích na odlet

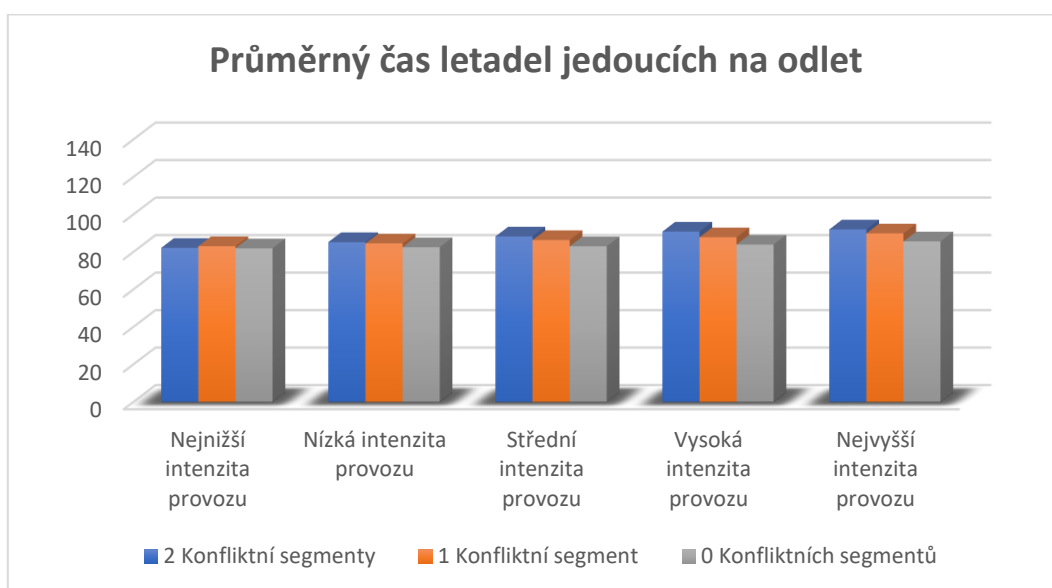
Na základě porovnání a výpočtu průměrných času doby letadel strávených v pojezdovém systému z push-back příčky až do samotného opuštění letadla z modelu jsou znázorněny v tabulce 3.4. Taktéž se jedná o data z pěti intenzit, které byly rozčleněny do jednotlivých scénářů na základě 0-2 konfliktních segmentů.

Segmenty/ Hustota provozu	Nejnižší intenzita provozu	Nízká intenzita provozu	Střední intenzita provozu	Vysoká intenzita provozu	Nejvyšší intenzita provozu
<b>2 Konfliktní segmenty</b>	82,17 s (±2,54)	85,25 s (±2,84)	88,29 s (±3,14)	90,87 s (±3,35)	92,01 s (±3,51)
<b>1 Konfliktní segment</b>	83,09 s (±2,63)	84,54 s (±2,77)	86,36 s (±2,95)	87,87 s (±3,09)	89,91 s (±3,27)
<b>0 Konfliktních segmentů</b>	81,96 s (±2,42)	82,53 s (±2,57)	82,99 s (±2,62)	83,95 s (±2,68)	85,63 s (±2,87)

Tabulka 3.4 - Průměrný čas průjezdu letadla infrastrukturou ze stání směřující k odletu

V grafu 3.10 se nachází na ose „x“ pět intenzit hustoty provozu, od nejnižší (10 letadel/hod.) po nejvyšší intenzitu provozu (50-55 letadel/hod.). Osa „y“ obsahuje průměrný čas letadel jedoucích ze zálivu jedoucích na odlet. V grafu jsou zahrnuta letadla jedoucí ze zálivu i letadla modelem pouze projíždějící s přiřazeným kritériem odlet. Časy v histogramu jsou uvedeny v sekundách.

Výsledky drží stejný trend jako v případě ostatních sledovaných proměnných, nejvyšší nárůst je vidět u 2 konfliktních segmentů s postupně se zvyšující intenzitou. Zvyšování je zde plynulé.



Obrázek 3.10 – Graf – Histogram průměrných časů odlétajících letadel jedoucích na vyčkávací místo RWY

### Průměrný počet udělených povolení na letadlo

Průměrný počet povolení je vyjádřen pomocí výpočtu průměrných povolení na letadlo. Odpovídá to počtu, kolikrát letadlo dostane další instrukce, kam dál pojíždět, tedy počet pomyslných zastavení v modelu, tyto hodnoty jsou uvedené v tabulce 3.5. Opět se jedná o data z pěti intenzit, které byly rozčleněny do jednotlivých scénářů na základě počtu konfliktních segmentů.

Segmenty/ Hustota provozu	Nejnižší intenzita provozu	Nízká intenzita provozu	Střední intenzita provozu	Vysoká intenzita provozu	Nejvyšší intenzita provozu
<b>2 Konfliktní segmenty</b>	1,11 (±0,01)	1,16 (±0,05)	1,18 (±0,03)	1,37 (±0,09)	1,50 (±0,08)
<b>1 Konfliktní segment</b>	1,10 (±0,02)	1,16 (±0,05)	1,16 (±0,03)	1,24 (±0,08)	1,25 (±0,07)
<b>0 Konfliktních segmentů</b>	1,10 (±0,02)	1,10 (±0,01)	1,10 (±0,01)	1,12 (±0,02)	1,11 (±0,01)

*Tabulka 3.5 – Průměrný počet udělených povolení na letadlo*

V tomto případě byl vyhodnocen průměrný počet povolení mezi 1-2 na letadlo se stoupající tendencí při navyšování počtu konfliktních segmentů. Hodnoty potvrzují předpoklad, ve 2 konfliktních segmentech se častěji stává, že je letadlo zastaveno, případně, že se ve své plánované trase musí vrátit. Rozmezí počtu povolení odpovídá rozsahu infrastruktury.

### **3.8 Implementace modelu v kontextu infrastruktury**

#### **Letiště v Praze**

Infrastruktura pražského letiště je z pohledu ATC velice propracovaná, kdy i při nenadálých situacích je ve většině případů možné alternativního řešení, aby provoz nemusel být přerušen. Skýtá mnoho pohybových drah k možnosti mnoha variant poježdění, mnoho složitějších úseků s křižovatkou a několik atypických zálivů, kde mají řídicí letového provozu vícero variant na koordinaci více letadel najednou.

V rámci pojezdových ploch se řídicí primárně zaměřují na několik faktorů, jsou jimi:

- Koordinace s externím řízením (přidělené stání, SLOTy)
- Plánování trasy – nejkratší a bez překážek
- Komunikace a koordinace s piloty
- Koordinace s dráhou
- Koordinace se zálivem a jednotlivými vytlačeními letadel ze stání
- Koordinace průjezdu letadel systémem
- Koordinace průjezdu letadel systémem se zvýšenou opatrností (častější pohyb v opačném směru – změna směru dráhy v používání).



Část pojezdových ploch v nově vyvinutém modelu řeší koncepčně většinu procesů, které jsou na letišti v sekci ATC, nebo je na ATC určitá návaznost. V případné implementaci do modelu, který skýtá infrastrukturu letiště v Praze je zapotřebí ji rozšířit a upravit. Logická část nově vyvinutého modelu je bez potřeby úprav vyvinuta k dalšímu použití v širším konceptu. Jediný problém je se samotnou integrací, která řeší složitost následujících prvků:

- Sofistikovaný algoritmus pro výběr trasy
- Složité zálivy a nespočet kombinací možné pro push-back, koordinaci vyjetí a zajetí do zálivu. Je zapotřebí každý záliv řešit individuálně s počtem možností a kombinováním s vytlačáním na příslušnou push-pozici a současným zajetím do zálivu, aby se předešlo zásahu a zpoždění pojíždění v rámci pojezdových ploch.
- Složitost křižovatek a navazujících segmentů – v mnoha částech infrastruktury jsou křižovatky velice blízko u sebe a tudíž mezi nimi není patřičně dlouhý segment pro možné potřeby modelu. Je nutností každou křižovatku řešit individuálně v návaznosti na veškeré možné scénáře při projetí, nebo příslušném zastavení a neomezování dalšího provozu.
- Specifika průjezdných stání – vyjetí z průjezdných stání je ojedinělé, jelikož letadlo vstupuje do části segmentu, tedy nevstupuje přes krajní switch. V tomto případě je potřeba zavést speciálního agenta, který by komunikoval s agentem SegmentControl a řídil pohyb letadel z průjezdných stání a řadil je do pojíždění potřebným směrem.

## **4 Sjednocení a porovnání modelu s již existující platformou**

Tato kapitola se věnuje popisu porovnání a nadstavby přístupu ATC v původním modelu a naprogramovanými algoritmy v současném modelu s možnou implementací do původního modelu, ale pouze koncepčně. Jednotlivé naprogramování všech částí letištní infrastruktury se zahrnutím složky ATC je velice složité z hlediska technického řešení všech možností, které letištní infrastruktura nabízí.

Dále je pomocí diskuze popsána možná implementace s rozšířenými algoritmy do modelu s infrastrukturou Letiště Václava Havla.

### **4.1 Rozdílnost složky ATC v předcházejícím a nově vyvinutém modelu**

V původním modelu složka ATC nebyla jasně definována. Avšak pro pohyb letadel musela být určitými pravidly a databází alespoň částečně nasimulována. Pomocí databáze byla zavedena pravidla soft a hard, tedy pravidla s možnou obměnou a pravidla neměnná, přičemž pro lepší přehlednost byla většina z nich naprogramována jako pravidla hard. Při konfliktech, které v modelu vznikaly bylo jako řešení nastoleno pár podmínek, které v reálném prostředí řeší ATC.

V nově vyvinutém modelu je model ATC nastaven pomocí populací několika agentů a jejich vzájemné komunikace. Hlavními jsou agent CrossingControl, který řeší křižovatky, agent ApronControl, který řeší zálivy a jejich výjezd a vjezd a agent SegmentControl, který řeší průjezdnost v jednotlivých segmentech, které obklopují křižovatky. Model je tedy nastaven pomocí komunikace základních agentů, kteří se starají o hladký průjezd letadel danou infrastrukturou.

Při vyhotovení původního modelu se vycházelo z dat, ze kterých nebylo možné detailně replikovat provoz na letišti. V poskytnutých datech se nenacházely přesné časy výskytu letadel v jednotlivých místech infrastruktury. Naopak časy ATA a AOBT poskytnuty byly, bohužel byly poskytnuty zaokrouhleně v celých minutách, což v celkovém výpočtu mohlo

zkreslovat až o necelé dvě minuty. V infrastruktuře, jako je na letišti Václava Havla by mohlo dojít k nepřesné replikaci. Proto v simulaci vznikaly kolize, ke kterým v reálném prostředí nedocházelo. Bylo nutno zavést algoritmy pro lokální blokování infrastruktury. Tyto algoritmy byly řešeny na úrovni infrastruktury formou blokace a rezervace daných úseků pojezdového systému.

Nově vyvinutý model byl navržen pro obecné simulování jednotlivých procesů spojených s ATC. Tyto algoritmy jsou řešeny pomocí agentů, kteří se snaží vzájemnou komunikací a nastavením předepsaných pravidel zamezit kolizím a tedy není potřeba potenciální konflikty řešit lokálně na úrovni infrastruktury. Tímto způsobem je docíleno obecného řešení, které znamená, že nedochází k řešení problému jednorázově v daný moment výskytu, ale jeho řešení je ucelené a obecné ve všech případech jeho zjištění.

### **Porovnání modelů v rámci koordinace v zálivech**

V rámci zálivů a celkového chodu zajíždění letadel a vyjíždění letadel ze zálivů, případně v kombinaci s vytlačení letadla bylo v původním modelu kooperováno na základě prvotního přihlášení do daného zálivu či segmentu k provádění potřebného úkonu. Na základě těchto přihlášení v modelu vznikaly pomyslné fronty, které měly určovat pořadí, kdo pojede, nebo vykoná svůj úkon v preferované části infrastruktury jako první.

V novém modelu je tento problém řešen pomocí samotného agenta, populací agentů. Pro každý záliv je přiřazen jeden agent z populace agentů ApronControl a tito agenti se starají o hladký chod průjezdu těmito zálivy. Algoritmus je řešen pomocí komunikace a tázání se agentů Aircraft a agentů ApronControl. Při potřebě zajetí na stání a přihlášení se letadla danému zálivu záliv řeší, zda mu v nejbližší době nebude vyjíždět nějaké letadlo ze stání a též zda nečeká nějaké letadlo již po vytlačení na vstup do infrastruktury. Pokud nikoliv, letadlo může zajet, pokud ano, jako první je upřednostňováno letadlo čekající na vstup do infrastruktury, pod podmínkou že má udělené povolení. Pokud nemá, následuje udělení přednosti zajíždějícímu letadlu, z důvodu blokování páteřní sítě. A když je prostor zcela volný, může letadlo na stání zahájit vytlačení.

## 4.2 Co nově navržený model neřeší

Kromě na první pohled jasné odlišnosti z hlediska velikosti infrastruktury také nově vyvinutý model neřeší plánování trasy letadla. Vzhledem k nasimulované části pojezdového systému, který je omezený v možnosti volby tras k pojíždění, kdy má model k dispozici dvě trasy a z nich je pouze jedna páteřní, nedává smysl plánování a případné obměny trasy. V rámci blokace při projíždění segmentů a křižovatek si vždy letadlo blokuje přilehlé části, aby nenastal konflikt a letadlo bezpečně projelo. Tyto části ostatní letadla vidí jako zablokovaná a tedy do nich nevjedou, respektive jim je tato skutečnost nahlášena přes agenta SegmentControl. Tato pomyslná blokace se nesmí vztahovat na letadla při plánování své trasy, aby se zamezilo zbytečným objížděním páteřních tras, když je na nich cesta průjezdná.

Dále nově vyvinutý model neřeší části jako je průjezdné stání, nebo komplikovanost zálivů u Hotelu1 a Julliety. Tato stání jsou velice specifická a je potřeba je řadit do speciální části a v rámci tvorby modelu pro ně vytvořit další agenty, které by regulovaly jejich provoz. U průjezdných stání je potřeba regulovat provoz při možném vjíždění do poloviny segmentu a možnosti obousměrné jízdy. V zálivu u Julliety je zase potřeba vytvořit nadřazeného agenta s populací třech dalších agentů, kteří by si regulovaly veškerý provoz. O této problematice bude diskutováno v další kapitole.

## 5 Diskuze

V rámci diskuze byla popsána implementace navržených algoritmu pro procesy na letišti, které jsou řízeny řídicími letového provozu a jejich rozšíření v rámci potenciální simulace celého Letiště Václava Havla v Praze.

Druhá část diskuze je věnována posouzení modelu v rámci bezpečnostních studií, kde pro vyhodnocení byly vybrány čtyři scénáře s možností namodelování v nově vyvinutém modelu. Tyto scénáře byly popsány s ohledem na nebezpečí a rizika v rámci bezpečnosti.

### 5.1 Implementace řešení v rámci modelu infrastruktury

#### Letiště Václava Havla

Infrastruktura na Letišti Václava Havla je velice specifická a skýtá mnoho možností pro ATC. Není zde zaveden tokový průjezd infrastrukturou, řídicí jsou nuceni vymýšlet různé varianty pro pojíždění letadel, kdy uvažují o nejvyšší bezpečnosti a efektivnosti propustnosti pojezdových ploch, samozřejmě jsou limitováni pravidly letiště. Na letišti se vyskytuje několik specifických částí, kde je potřeba navržení speciálních algoritmů v rámci řídicích agentů.

##### 5.1.1 Celkový průjezd infrastrukturou

Algoritmus pojíždění, který je navržený v části pojezdového systému, je zcela připraven k implementaci do širší sítě. Nutnými předpoklady je kooperace v rámci složitějších křižovatek, nastavení průjezdu dlouhých obousměrných segmentů a zohlednění průjezdných stání.

Letadla při vstupu do modelu mají naplánovanou trasu, která se ve stejném okamžiku objeví agentům, kterým křižovatka, segment, nebo záliv na trase náleží. Tito agenti dle předpokládaného času vědí, kdy bude letadlo jejich částí projíždět. Avšak na čas se dotazují až při potenciálním konfliktu, letadlo jim ho samo nezasílá (toto je stejné jako u jiných agentů). Jako první komunikují letadla se segmenty, které s dostatečným předstihem a po dotázání letadla posílají zpět letadlu zprávu, zda je jejich úsek možné projet či nikoliv. V rozsáhlejší infrastruktuře, jako je infrastruktura Letiště Václava Havla je potřeba

identifikovat možné obousměrné úseky a projíždějící letadlo je nuceno se na tuto informaci agentů dotazovat. V průjezdu křižovatkou je potřeba zakomponovat rozsáhlejší infrastrukturu a vyšší intenzitu letadel. Zde je potřeba vložit algoritmus s prioritizací letadel k průjezdu.

### **Pojezdové dráhy – páteřní trasy**

V případě volby pojížděcí dráhy na příslušné stání a v opačném případě volby pojížděcí dráhy při pojíždění na vyčkávací místo před vstupem na dráhu byl zvolen odlišný algoritmus. V původním modelu je tento princip řešen způsobem zablokování určitých tras, jako například vzletové a přistávací dráhy, pojezdové dráhy D a dalších pojezdových drah u průjezdného stání. Zablokování možných drah pak vyselektuje cestu pro projíždění daného letadla. Volba konkrétní pojezdové dráhy už byla na algoritmu modelu, který si trasu vypočítal sám.

Nově vyvinutý model je založen na výpočtu trasy na základě aktuálního provozu, která se letadlu načítá těsně před samotným vstupem do modelu a trasa se v průběhu již nemění. Veškeré potenciální komplikace na trase jsou vyřešeny dopředu. Vybraná trasa je nahlášena všem agentům segmentů, společně s preferovaným směrem průjezdu, tyto informace si pak agenti ukládají v sobě. Letadlu se vrátí zpětná vazba, kam až je cesta v jeho směru v daném čase průjezdná. V případě více po sobě jdoucích konfliktních segmentech je zapotřebí učinit další kroky, které již byly popsány v kapitole 3.3.1.

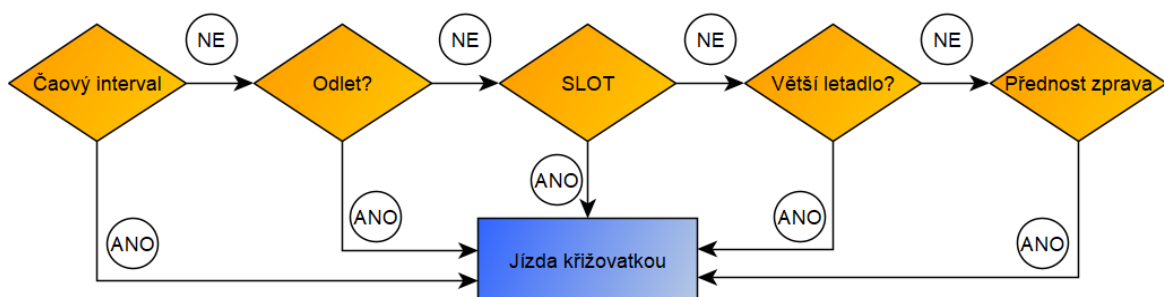
### **Křižovatky**

V původní modelu jsou křižovatky řešeny pomocí konceptu „first come first serve“. Tedy, které letadlo přijede do křižovatky jako první, udělá si rezervaci a provádí svůj úkon. Další letadlo, nehledě na jeho aspekty, které by chtělo křižovatkou projet, musí počkat.

V nově vyvinutém modelu je řešení křižovatek vyřešeno na bázi kritérií. Křižovatky neřeší žádné kolizní prvky, jen při výskytu více letadel v obdobném čase se rozhoduje o prvenství průjezdu, ale samotný konflikt již nevzniká.

Vzhledem k složitější infrastruktuře křižovatek na pražském letišti je potřeba, aby byly všechny přilehlé segmenty, konkrétně všechny části, které jsou spojovány a kříženy s trasou průjezdu křižovatkou zamezeny k průjezdu dalších letadel.

V řešení přednosti letadel v křižovatkách by se algoritmus řídil na základě předdefinovaných kritérií. V dalším bodě by byla nastavba o jistou prioritizaci a její zvyšování v potřebě průjezdů letadel. Tedy v prvním případě je princip následovný. Každá křižovatka, tedy agent křižovatky (v reálu ATC) zná, v jakém čase letadlo do křižovatky vstoupí a v jakém z ní opět vystoupí. Pokud se tyto dva časy u více letadel překrývají, je potřeba, aby agent jedno upřednostnil. Pokud se výsledná hodnota nebude v rámci časů vstupu a výstupu z křižovatky překrývat, není potřeba dalších kritérií a průjezd je bez komplikací. V opačném případě propadne řešení do dalšího kritéria, kterým je střet příletu a odletu. Pokud tak nastane, přednost dostává odlet. V případě střetu jiných možností letadel propadá podmínka do dalšího kritéria. Třetím kritériem na vyhodnocení přednosti v křižovatkách, za předpokladu střetu dvou letadel jedoucích na odlet je časový SLOT – letadlo, které má více času do odletu, tedy pozdější SLOT, dává přednost druhému letadlu. SLOTy jsou vydávány letadlům z důvodu, aby nedošlo k přeplnění vzdušného prostoru. Pomocí těchto časů se reguluje počet letadel ve vzdušném prostoru. SLOT se počítá od okamžiku zahájení pojíždění. Letadlo, kterému byl SLOT přidělen dříve a tedy mu časový interval do -5 minut před CTOT a do +10 minut po CTOT uplyne dříve, dostává přednost. Čtvrtým kritériem je kategorie rozměrů letadla, kde větší letadlo dostává vyšší prioritu a křižovatkou projede jako první. V případě, pokud by nastala shoda i zde, přejde se k poslednímu kritériu, které zní, že dostane přednost letadlo, které do křižovatky přijíždí zprava. V modelu je tento proces znázorněn zastavením pro lepší přehled a následné vyhodnocení, avšak v reálném prostředí by k zastavení nedošlo. Všechny úkony jsou řešeny s dostatečným předstihem. Kritéria jsou graficky znázorněna na obrázku 4.1.



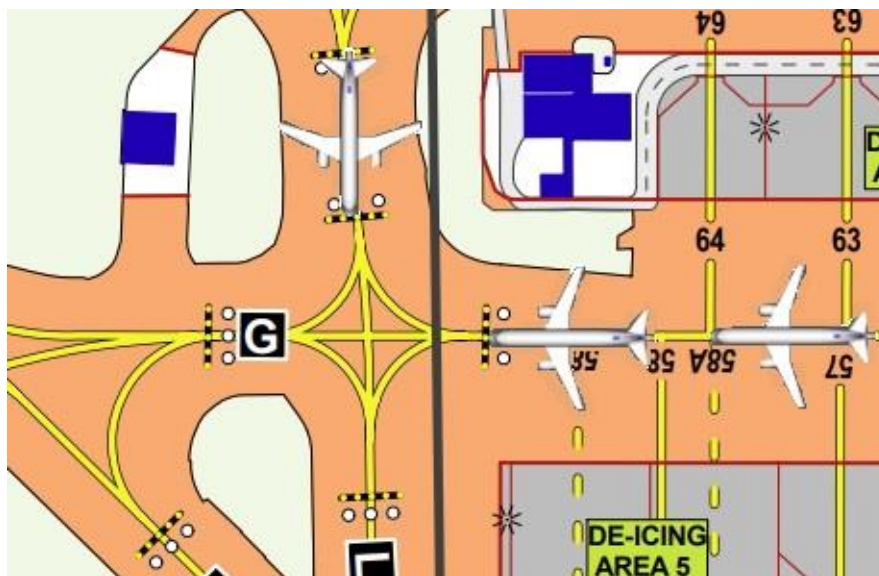
Obrázek 4.1 – Stavový diagram ATC pro potencionální udávání přednosti v křižovatkách

V druhém případě by byly nastaveny hodnoty s váhou priorit. Na základě daných kritérií by již ve vstupu do modelu měla letadla čísla, která by symbolizovala jejich hodnotu priority pro

prvenství v průjezdu. Tyto čísla by se vždy před příjezdem porovnávala a letadlo s větším číslem, tedy větší prioritou by mělo přednost. Kritéria by byla totožná jako v předchozím případě s odlišností příjezdu více letadel do křižovatky. Zohledněno na obrázku 4.2.

V případě, že při prvním dotazu letadlo od agenta CrossingControl dostane odpověď negativní, tak musí chvíli počkat, než letadlo s vyšší prioritou projede. Ihned po projetí letadla s vyšší prioritou se odešle zpráva o jeho dokončení průjezdu a první letadlo se může opět začít dotazovat na průjezd svou trasou. V každém momentě, kdy letadlo musí dávat jinému letadlu přednost, se jeho předpokládaný čas v dalších křižovatkách automaticky přepočítá, tak aby po projetí celé trasy vyšel reálný čas strávený v pojezdovém systému a současně je vidět, po kterých segmentech letadlo skutečně jelo.

Dále je třeba zvážit scénář, kdy se v křižovatce setkají 3 letadla současně. Zprava by přijelo letadlo s mírou priority 60, zespodu by přijelo letadlo s mírou priority 40 a v těsném závěsu za ním by přijelo letadlo s mírou priority 90. V tomto případě by došlo k přeformování hodnot priorit. Tím, že nejvyšší prioritu má letadlo přijíždějící za jiným letadlem, tak by se priorita letadla před ním zvýšila na totožné číslo letadla za ním a tedy by dostalo současně s letadlem za sebou přednost.



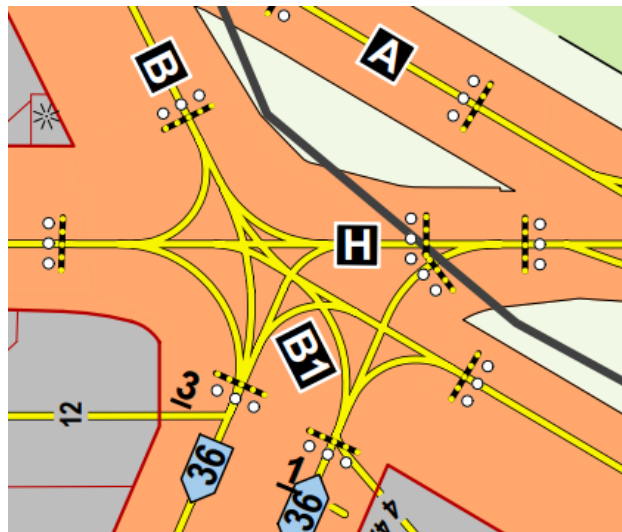
Obrázek 4.2 – Nastínění situace s prioritizací v křižovatkách (upraveno autorem) [27]

Tímto způsobem dochází k implementaci smysluplnějšího řešení jízdy letadel po pojezdových plochách. Dostává přednost letadlo, které potřebuje být na své cílové destinaci co nejdříve.



### Náročnější křižovatky

Křižovatky u zálivu Bravo1 a Bravo2, graficky znázorněny na obrázku 4.3, jsou prolnuty do sebe, kde vzniká více variant křížení. V této části je potřeba zamezit průjezdu v přiléhajících a křížících se částech křižovatky. U této specifické problematiky je zapotřebí je z důvodu prolínání křižovatek nastavit jako jednu a řešit její průjezd specificky. Pomocí zakázání jízdy v přilehlých částech nedojde ke střetu letadel, ale v případě naprosto odděleného průjezdu není potřeba letadlo zbytečně blokovat a zdržovat.



Obrázek 4.3 - Křižovatka Bravo, Hotel, Bravo1 a Zulu [27]

Další velice specifická křižovatka je u pojezdové dráhy Foxtrot, těsně před vjezdem do nového zálivu Hotel1, graficky znázorněna na obrázku 4.4. Tato křižovatka je specifická nejen svou rozlohou, ale i tím, že velice brzy navazuje na následující křižovatky. V tomto případě bylo zjištěno, že nejefektivnějším způsobem je spojení všech tří křižovatek do jedné. Avšak to nutně neznamená, že celou spojenou křižovatkou pojede vždy pouze jedno letadlo. Při nekřížující se trase může jet letadel mnohem více najednou, jen se celá problematika a algoritmus budou řešit v rámci jedné křižovatky.



Obrázek 4.4 - Křižovatka Foxtrot, Lima, Hotel [27]

### Obousměrné segmenty

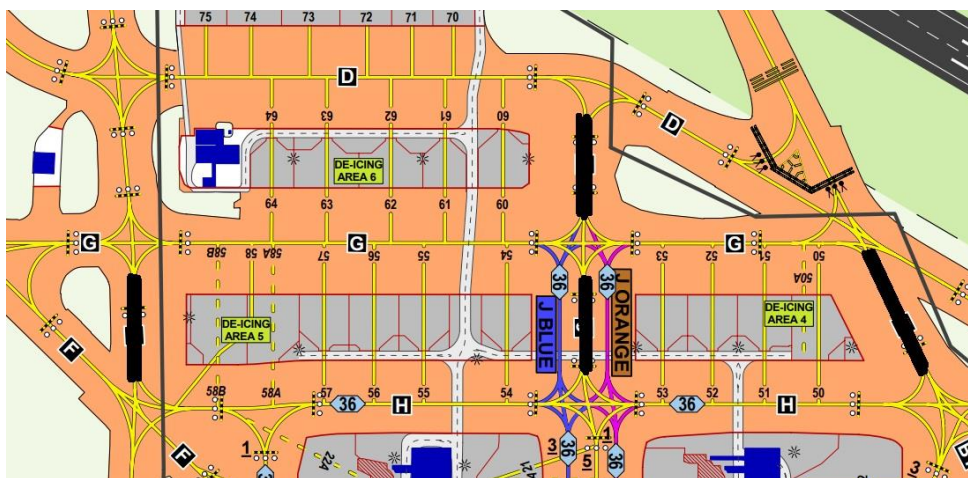
Řešení obousměrných úseků je pro model a algoritmus jedna z nejsložitějších věcí. V původním modelu obousměrné segmenty nebyly nijak specificky řešeny. V modelu byly páteřní trasy po kterých letadla jezdila a vzhledem k algoritmu dopředných rezervací nemusely být řešeny.

Nově navržený model, který je modelem ATC a celý algoritmus je založen na agentech, který provoz řídí bylo zapotřebí k řešení pojiždění infrastrukturou přistoupit jinak. A v rámci postupné úpravy algoritmu vyvstaly na povrch obousměrné segmenty. V reálu je přístup opět trochu odlišný, vzhledem k tomu, že ATC sedí na věži a svým zrakem může provoz sledovat a na základě toho dělat určitá rozhodnutí (tedy, neposlal by dvě letadla jedoucí opačným směrem proti sobě). V modelu je zapotřebí tuto problematiku ošetřit algoritmy. Tedy již při vstupu letadla do modelu, (pouze plánováním, nikoliv fyzickým vstupem), každý segment zná směr letadla, který se na něj přihlásil a bude jím chtít projet. Tyto agenti, tedy agenti SegmentControl mají za úkol naplánovat a udělovat letadlům povolení k průjezdu tak, aby se žádná dvě nepotkala ve směru jedoucím proti sobě. Toto je zaručeno algoritmem, který v sobě nese agent SegmentControl, tedy drží vždy jeden směr segmentu a snaží se, aby letadla na vstupech dlouho nečekala.

Na druhé straně agent Aircraft, tedy pojiždějící letadlo v momentě, kdy dostane zákaz vjezdu na některý segment z důvodu konfliktního úseku, je povinno se agenta SegmentControl dotázat zda segment před není taktéž konfliktní. Pokud by byl, je nutné, aby se vzdal uděleného povolení a počkal ještě o jeden segment dříve. Toto pravidlo bylo zavedeno z důvodu, že v na konfliktní segment se letadlo z druhé strany přihlásilo dříve tedy od agenta dostalo povolení, jenže já jsem se přihlásila na navazující konfliktní segment před ním a tedy na něj jsem dostala povolení já. Zde by došlo k problematice jedoucích letadel proti sobě a v několika případech by nebylo možné žádné východisko. Proto bylo zavedeno, že v momentě zablokování trasy se letadlo táže agenta SegmentControl jaký je segment před mým posledním, pokud je opět konfliktní mé povolení vjezdu na něj se zruší a já čekám před posledním nekonfliktním segmentem.

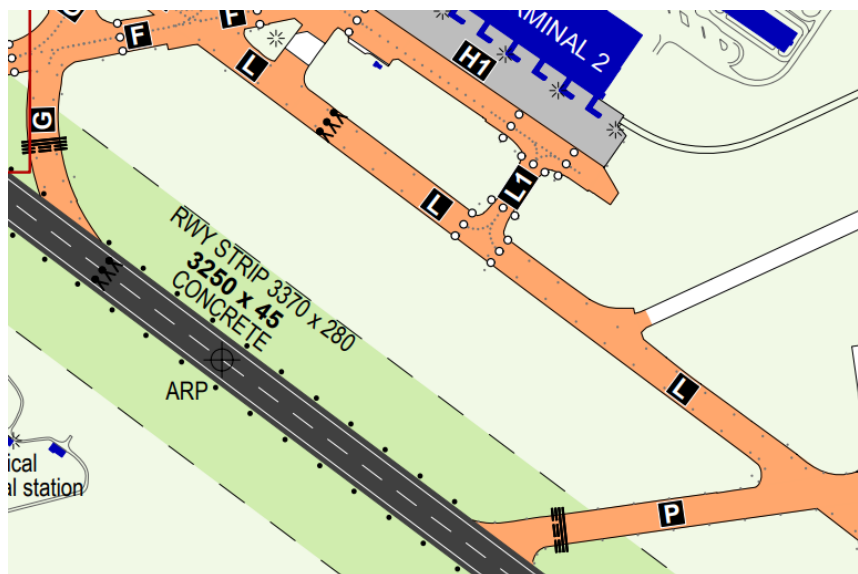
Na letišti v Praze bylo z historických dat vyzorováno několik kratších úseků, kde se letadla pohybují nejčastěji v obou směrech za každé situace, nejen při změně směru dráhy v používání. Tyto úseky jsou znázorněny na obrázku 4.5.

Pro Letiště Václava Havla byla v tomto případě zvolena metoda sloučení křižovatek. V těchto krátkých úsecích se na základě výsledků popsaných v kapitole 3.6.3 vyplatí z hlediska koordinace a hladkého a bezpečného průjezdu sloučit křižovatky na problematických úsecích do jedné. O to více, když je několik konfliktních segmentů po sobě. V takové infrastruktuře dochází ke zbytečné komplikaci řízení, efektivnější postup by pak spočíval právě ve sloučení křižovatek.



Obrázek 4.5 - Identifikované kratší obousměrné úseky na letišti Václava Havla v Praze  
(upraveno autorem) [27]

Naopak při identifikaci delších konfliktních segmentů, jako je tomu při pojíždění ze severní části letiště na jižní a opačně, byla shledána efektivnější metoda směřování segmentů. Tento úseku je znázorněn na obrázku 4.6. Při spojení křižovatky do jedné docházelo k zbytečnému zdržení a neefektivnosti provozu. Tento úsek je specifický tím, že se nedá nikterak objet ani využít jinou trasu. Jediná varianta je využití vedlejší dráhy jako dráhy pojezdové. Tato možnost není nemožná, ale za běžného provozu se nevyužívá, využívá se pouze ve speciálních případech, jako jsou například hospital flight.



Obrázek 4.6 – Identifikace delších obousměrných segmentů na letišti Václava Havla v Praze

[27]

## Zálivy

Další rozdílností je koordinace letadel v zálivech, primárně vyjíždění letadel ze stání. V původním modelu je vytlačení ze stání řešeno na základě databázi, v závislosti na typu stání a jeho polohy v rámci odbavovacích ploch, ověřuje se dostupnost cílové pojezdové dráhy a řeší se rezervace segmentů a křižovatek jako při běžném pojíždění.

V nově vyvinutém modelu je princip založen na komunikaci mezi jednotlivými agenty, v tomto případě agenta ApronControl a agenta Aircraft. Agent ApronControl již od začátku celé jízdy letadla v pojezdovém systému ví, na který záliv jede a v případě potřeby se dotazuje v kolik je jeho předpokládaný čas příjezdu. Na základě těchto informací vyselektuje možné potenciální střety v rámci vyjíždění a zajíždění na stání. V případě potenciálního konfliktu agent začne

řešit, které letadlo má při kterém úkonu přednost. Na výběr má ze 3 možností. Letadlo přijíždějící do zálivu, letadlo vytlačené ze stání a čekající na povolení k pojezdění a letadlo na stání, čekající na povolení k vytlačení. Ve vytvořeném modelu je zvolen postup následovný. Jako první jsou oslovována letadla čekající před vstupem do pojezděcího systému, v případě, že mají udělené povolení. Povolení je letadlu udělováno, když má garantovaný a volný první segment po vyjetí ze zálivu, v opačném případě mu nemůže být povolení uděleno. V pořadí druhém agent oslovuje letadla čekající na vjezd před zálivem. Tyto letadla potřebují mít záruku, že na jejich cestě nestojí žádné jiné letadlo a pokud ano, tak že se mu bez problému mohou vyhnout. Tato možnost je v mnoha případech upřednostňována, aby nedocházelo ke zdržení průjezdu infrastrukturou. Třetí možností je oslovení letadel čekajících na vytlačení ze stání. Tyto letadla potřebují mít pouze garanci možnosti výjezdu. Tedy potřebné délky uvedené pro příslušné stání v databázi. Tento celý proces probíhá v zlomku několika vteřin, tudíž se nestává, že by se provoz zcela zastavil a dlouze se čekalo.

Při výjezdu ze zálivu je potřeba dvou povolení, letadlo musí dostat povolení k vytlačení ze stání a dále musí dostat povolení k pojezdění, kde je nutné, aby byl průjezdný první segment infrastruktury v potřebném směru. Pokud letadlo nedostane povolení na první přihlášení, je v rámci algoritmu přeneseno do kolekce letadel s čekáním. V momentě, kdy se segment uvolní, je letadlo upozorněno o jeho uvolnění a může si žádat o povolení znovu. Při volném průjezdu letadlo dostává poslední povolení od agenta ApronControl, který se o něj dále nestará. Letadlo si v průběhu pojezdění přebírá agent SegmentControl.

V implementování algoritmu zajíždění a vyjíždění ze zálivu do velkého modelu bylo nastíněno několik variant. Jen je potřeba při implementaci do konkrétních zálivů vyskytujících se na letišti Václava Havla počítat se složitostí infrastruktury a zohlednit jí ve specifických úpravách, případně vyřešením složitosti několika podmínkami. Při možném střetu v průběhu zajíždění a vyjíždění ze zálivu byla vymyšlena nastavba pro rozsáhlejší infrastrukturu, která je na Letišti Václava Havla. Tato nastavba spočívá v řešení kritérií obdobně jako je tomu u křižovatek. Je zde nastaveno několik kritérií, dle kterých se celý proces řídí. Tato myšlenka byla dále rozvinuta do možných scénářů:

1. scénář – pokud letadlo na přiletu nemá přidělený SLOT (v tabulce 4.1 první možnost), dává letadlo přednost přilétajícímu letadlu, z důvodu, že bude rychlejší, letadlu na

odlet již nevdí pár minut vyčkání a současně letadlo, které jede z příletu nebude bránit, respektive krátce blokovat pojízděcí trasu pro další letadla.

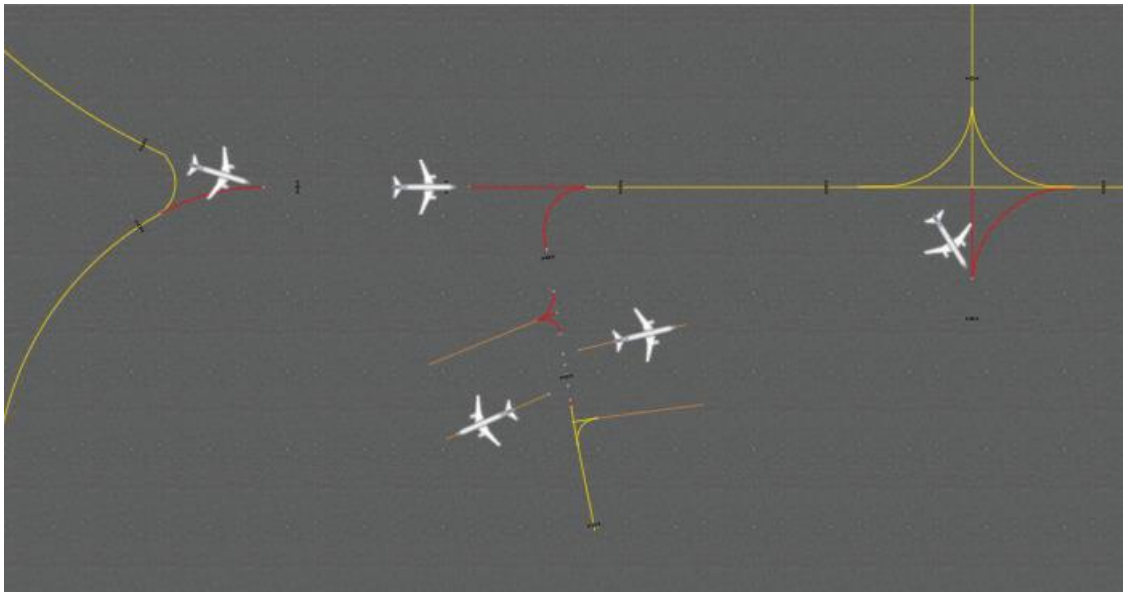
2. - 3. scénář – je velice podobný první variantě, je zde vyhodnoceno, že letadlo na odletu má přidělený SLOT, ale není ohroženo jeho dodržení (v tabulce 4.1 druhá a třetí možnost). V tom případě opět ze zmíněných důvodů dává přednost odlétajícímu letadlu a letadlo na stání chvíli vyčká, než přilétající letadlo bude na svém stání.
4. scénář – letadlo na odletu má přidělený SLOT, ale kdyby dávalo přednost letadlu z příletu, bylo by ohroženo jeho včasné stihnutí (v tabulce 4.1 čtvrtá možnost). V tomto případě dostane letadlo z příletu pokyn vyčkat, než vyjede letadlo, které jede na přílet, aby byl dodržen správný čas.

V tabulce 4.1 je znázorněna modelová situace znázorněna pomocí diagramů.

Odlet - bez SLOTu	Odlet - se SLOTem zcela OK	Odlet - se SLOTem indiferentní v přednosti - stíhá	Odlet se SLOTem musí být upřednostněn
Dává přednost	Dává přednost	Dává přednost	Musí být upřednostněn

*Tabulka 4.1 - Zobrazení dávání přednosti v zálivu při vytlačení a současně zajetí letadla na stání*

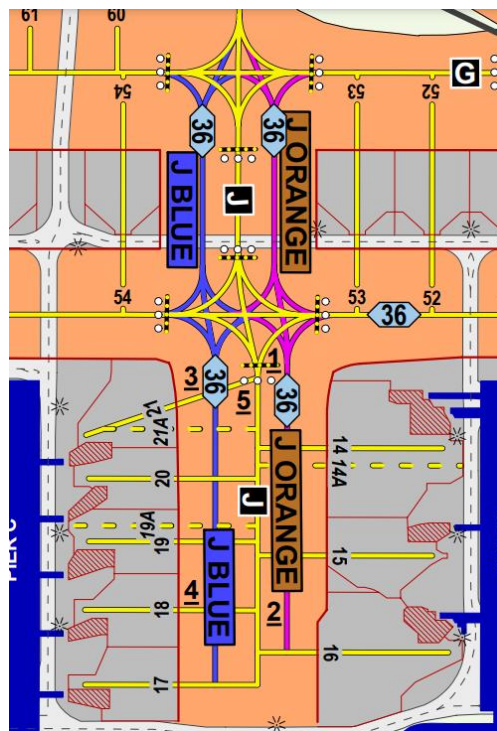
Jakmile letadlo směřující na odlet teprve s vytlačení ze stání začíná, agent dle typu letadla pokračuje ve vyhodnocení kritérií, pokud se jedná o letadlo větší, s pravděpodobně delší dobou vytlačení, algoritmus dá přednost letadlu přilétajícímu. Pokud by se jednalo o letadlo menších rozměrů, dostalo by přednost ono. Ve chvíli, kdy má letadlo přidělený SLOT dostává přednost dle obrázku 4.7.



*Obrázek 4.7 - Model řešení při vytlačení ze stání a současně dojezd na stání*

Zálivy na letišti Václava Havla v Praze tvoří další specifickou problematiku. V obecném smyslu by bylo nejlepší nechat jednoho hlavního agenta pro zálivy, kde by byly nastaveny obecné parametry. S tím, že každý záliv by měl své dílčí agenty, kde by byly podmínky specializované pro již konkrétní zálivy.

Specifický záliv u pojezdové dráhy Juliet skýtá mnoho variabilit v rámci pojíždění, jeho znázornění je na obrázku 4.8. V tomto zálivu je zapotřebí třech dílčích agentů, kde by se každý staral o jeden možný příjezd do zálivu a zároveň by komunikovaly mezi sebou. Každý agent by měl nastavená pravidla možného rozměru letadla, která do zálivu můžou zajet, tedy modrý a oranžový agent by byl omezen rozpětím křídel letadla do 36 metrů. Žlutý by žádné omezení do rozpětí křídel neměl, jelikož na tomto zálivu je i stání pro letadlo A380. V tomto zálivu je možných více kombinací, zvláště při využití postranních vjezdů a výjezdů, tedy modré a oranžové části. Zde je možné provádět několik vytlačení ze stání zároveň, je možné současně pojíždět do zálivu i ze zálivu, dokonce je možné, aby jedno letadlo zajíždělo a jedno vyjíždělo. U tohoto zálivu se nachází i několik push-pozicí, které se dají v rámci potřeby volně kombinovat.



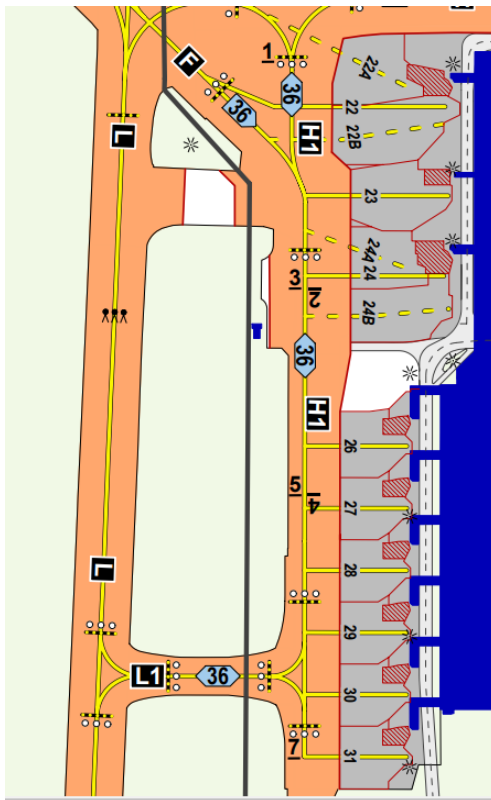
Obrázek 4.8 - Komplikovaný záliv u pojezdové dráhy Julliet [27]

Záliv Hotel1, který byl na letišti Václava Havla v Praze vybudován nedávno, skýtá nespočet možností a kombinací v jízdě na i ze zálivu. Záliv je znázorněn na obrázku 4.9. Stání jsou zde vedle sebe, nikoliv naproti sobě a jsou zde zavedeny dvě cesty. Obdobně jsou tomu přizpůsobeny push-poziční, kdy z každého zálivu lze vyjet na obě strany. Záliv je možné používat jako pomyslné kolečko, kdy by jedna cesta byla specializována na výjezd a druhá na zájezd letadel, tedy v tomto případě by nehrozil možný střet a letadla by mohla pojíždět skoro bez povolení agentů. Tento způsob je lehký na koordinaci letadel, ale zbytečně by byly zredukovány další možnosti pro pojiždění, kterými tento záliv disponuje.

Řešení v rámci této infrastruktury by spočívalo v jednom agentu, který by dohlížel na celý záliv. Agent by měl pod sebou všechny push pozice, které by zároveň udávaly směr jízdy v zálivu. Vždy ve stejném přihlášení dvou letadel najednou by se agent snažil letadla vytlačit každé na opačnou stranu, aby nemusel řešit, že by jedno muselo čekat za druhým. Tato varianta je možná v případě, kdy žádné letadlo není přihlášené na příjezd na stání. V tomto zálivu je opět potřeba koordinovat veškeré vstupy a výstupy ze všech možných směrů. Je potřeba, aby měl agent informace o čase a směru příjezdu všech letadel přihlášených na stání a rovněž vedl v patrnosti letadla u kterých probíhá handling, že by se v nejbližší době mohla přihlásit o povolení na výjezd. Pro tento záliv by bylo dobré zavedení databáze, kde by byla



uložena všechna stání a jejich možnosti vzájemných prolínání při vytlačení ze stání a současně zajištění na stání. Obdobná databáze již slouží v nově vyvinutém modelu, jen by pro infrastrukturu na pražském letišti potřebovala rozšířit.



Obrázek 4.9 – Nový záliv Hotel1 [27]

## 5.2 Shrnutí implementace agentů do infrastruktury LKPR

Bylo využito třech agentů pro potřeby modelu, kde agenti reprezentují roli řídicího v letovém provozu. Varianta možné implementace do celé struktury pražského letiště by spočívala v definování dalších agentů, kteří by reprezentovaly dílčí procesy, které se na letišti provádí. Již zavedení agenti a jejich distribuce v nasimulovaném modelu jsou připraveni na rozvinutí dalších řídicích procesů. Dalšími možnými agenty jsou agent RWY, který by fungoval opět jako populace agentů a každá populace by měla na starost jeden sjezd z příslušné RWY. Tento proces by mohl fungovat velice obdobně jako napojení agenta koordinující zálivy a jejich cestu. Další agent by mohl mít na starosti jednotlivá stání, řešil by proces jejich přidělení a současně by mohl řešit odbavení letadel v rámci letiště. S tímto agentem by byla

spojena komunikace pro hlášení volných či obsazených stání pro přilétající letadla. Jako další agent pro infrastrukturu letiště by mohl být zaveden agent koordinující odmrazovací plochy, který by úzce kooperoval s agentem pro přidělování stání. Následující agent by mohl mít na starosti SLOTy, nejen, že by je letadlům tlumočil, ale i by tyto letadla hlídal, aby se co možná nejméně stávalo, že letadlo v rámci SLOTu neodstartuje. Jiný agent by měl na starosti průjezdná stání. Tento agent by úzce spolupracoval s agentem ApronControl, ale logiku vyjíždění by měl svou vlastní, z důvodu připojování se do segmentu v jeho části, nikoliv na jeho začátku. A v neposlední řadě by byla potřeba stávající agenty rozšířit na přesné parametry infrastruktury pražského letiště.

Pomocí rozvětvení agentního řízení by došlo k umožnění snazšího řízení, než představuje řízení centralizované.

### **5.3 Možnosti využití modelu v rámci tvorby bezpečnostních studií**

*„Systém řízení bezpečnosti (SMS) je navržen tak, aby řídil bezpečnostní riziko na pracovišti, přičemž bezpečnost práce je definována jako snížení rizika na úroveň, která je tak nízká, jak je rozumně proveditelné, aby se předešlo zranění osob.“ [24]*

*„SMS poskytuje systematický způsob, jak nepřetržitě identifikovat a monitorovat nebezpečí a kontrolovat rizika při zachování ujištění, že tyto kontroly rizik jsou účinné.“ [28]*

SMS je komplexní a strukturovaný rámec, který organizace implementují k zajištění bezpečnosti svých operací, zejména v odvětvích, kde je bezpečnost kritická, jako je letectví. Zásadní význam systému řízení bezpečnosti je přinést systematický přístup k řízení bezpečnostních rizik v provozu, včetně organizačních struktur, odpovědnosti, zásad a postupů. [21, 22]

Letectví se vyvinulo v jeden z nejbezpečnějších způsobů dopravy, a to především díky přísným bezpečnostním standardům a postupům zavedeným v tomto odvětví. Jádrem tohoto bezpečnostního závazku je systém řízení bezpečnosti v letectví, komplexní rámec určený

k identifikaci, hodnocení a zmírňování rizik. K aktivnímu vyhledávání potenciálních rizik a ke zmírnění již identifikovaných rizik se používají metody:

- Prediktivní (safety studie) – události které se přihodily
- Proaktivní (audity a inspekce) – potenciální nebezpečné události, které byly rozpoznány
- Reaktivní (šetření příčin událostí) – předvídání událostí, které by se mohly stát [20, 28]

SMS má ve svém rámci čtyři složky, které jsou často označovány jako čtyři pilíře systému řízení bezpečnosti a těmi jsou:

- Bezpečnostní politika bezpečnosti a cíle
- Řízení bezpečnostních rizik (SRM)
- Zajištění bezpečnosti
- Podpora bezpečnosti [28]

Letectví je komplexní a vzájemně propojený obor, který vyžaduje pečlivou pozornost k detailům a neochvějný závazek k bezpečnosti. Procesy identifikace nebezpečí a bezpečnostních studií tvoří páteř bezpečnosti letectví a zajišťují, že rizika jsou identifikována, analyzována a zmírňována tak, aby byly zachovány nejvyšší standardy provozní bezpečnosti. [24, 28]

Identifikace nebezpečí je základním kamenem bezpečnosti letectví. Zahrnuje systematický přístup k identifikaci potenciálních nebezpečí, známých i nepředvídaných, která by mohla ohrozit bezpečnost letového provozu. Od technických poruch až po environmentální faktory, nebezpečí přicházejí v různých podobách a proces jejich identifikace je proaktivním opatřením k odvrácení potenciálních katastrof. [24, 28]

### **Proces řízení změn**

Změna v letectví zahrnuje spektrum úprav, od přijetí nových technologií až po revizi provozních postupů. Tyto změny, i když jsou často přínosné, mohou přinést nová rizika, pokud nejsou náležitě řízeny. Proces řízení změn zajišťuje hladkou implementaci změn

a integrace bezpečnostních postupů do tohoto procesu zlepšuje hodnocení a zmírňování rizik. [24, 25]

### **Identifikace nebezpečí v rámci řízení změn**

Proaktivní hodnocení - při plánování změn identifikace nebezpečí analyzuje potenciální rizika spojená s navrhovanými změnami. Tento proaktivní přístup umožňuje předvídat výzvy.

Provozní dopad - identifikace nebezpečí vyhodnocuje, jak by změny mohly ovlivnit každodenní provoz, a identifikuje scénáře, kde mohou nastat nová rizika.

Statistiky založené na datech - historická data, zprávy o incidentech a získané poznatky poskytují cenné informace o potenciálních nebezpečích spojených s podobnými změnami v minulosti. [24, 25]

Procesní nebo provozní změny jsou nedílnou součástí letectví, ale bezpečnost zůstává vždy jeho základem. Integrace identifikace nebezpečí a bezpečnostních studií do procesu řízení změn zajišťuje, že pokrok nebude na úkor bezpečnosti. Proaktivním vyhodnocováním potenciálních nebezpečí, pochopením jejich důsledků a vývojem účinných strategií zmírňování mohou letecké organizace bezpečně procházet změnami. Tento holistický přístup nejen minimalizuje rizika, ale také kultivuje kulturu zaměřenou na bezpečnost, které se daří tvářit v tvář vývoji a inovacím. Pomocí nově vyvinutého simulačního modelu lze rekonstruovat určité události, které jsou popsány v kapitole 5.1.2. [24, 25]

### **5.3.1 Bezpečnostní analýza**

Bezpečnostní studie jako součást řízení změn:

Analýza kořenových příčin - bezpečnostní studie provedené jako součást řízení změn se ponoří do hlavních příčin identifikovaných nebezpečí. Tato hlubší analýza pomáhá formulovat účinné strategie zmírňování rizik. [24, 26]

Zajištění shody - bezpečnostní studie zajišťují, že změny jsou v souladu s leteckými předpisy a průmyslovými standardy a zachovávají integritu bezpečnosti. [24]

Modelování scénářů - bezpečnostní studie simulují různé scénáře, aby porozuměly tomu, jak se nebezpečí mohou projevit, a vyvíjejí strategie, jak vhodně reagovat. Tato metoda byla

využita i v této práci, pomocí nasimulovaného modelu je možné simulovat určité situace u kterých je potřeba ohodnotit, jaký budou mít vliv na celkový provoz. Toto hodnocení probíhá na základě parametrů, kterými jsou čas, počet nezbytného zastavení, počet rizikových po sobě jdoucích konfliktních segmentů a na základě intenzity provozu. [24]

### **Klíčové aspekty bezpečnostních studií:**

Analýza kořenové příčiny - bezpečnostní studie zkoumají a odhalují základní příčiny přispívající k nebezpečí. Identifikace základních příčin pomáhá při vývoji cílených řešení. [26]

Modelování scénářů - bezpečnostní studie využívají modelování scénářů k simulaci různých situací a posouzení, jak by se nebezpečí mohla rozvinout. To pomáhá při vývoji strategií reakce. [24]

Dodržování předpisů - bezpečnostní studie zajišťují, že letecký provoz dodržuje regulační normy a pokyny, čímž se vyhne právním a finančním důsledkům. [24]

Neustálé zlepšování - poznatky z bezpečnostních studií informují o průběžných zlepšováním provozních postupů, technologií a školení. [24]

Cílem těchto studií je porozumět hlavním příčinám nebezpečí, posoudit jejich potenciální důsledky a vyvinout účinné strategie ke zmírnění rizik, která jsou součástí výsledné bezpečnostní analýzy.

### **5.3.2 Scénáře nově vyvinutého modelu pro možnost tvorby bezpečnostních studií**

Jednou z možností, jak lze provést bezpečnostní studii pro potřeby generování dat a simulace jednotlivých možných scénářů je použití konkrétního modelu. Simulace jsou jedním z nástrojů, které jsou využívány v rámci hodnocení nebezpečí a rizik pomocí generování dat.

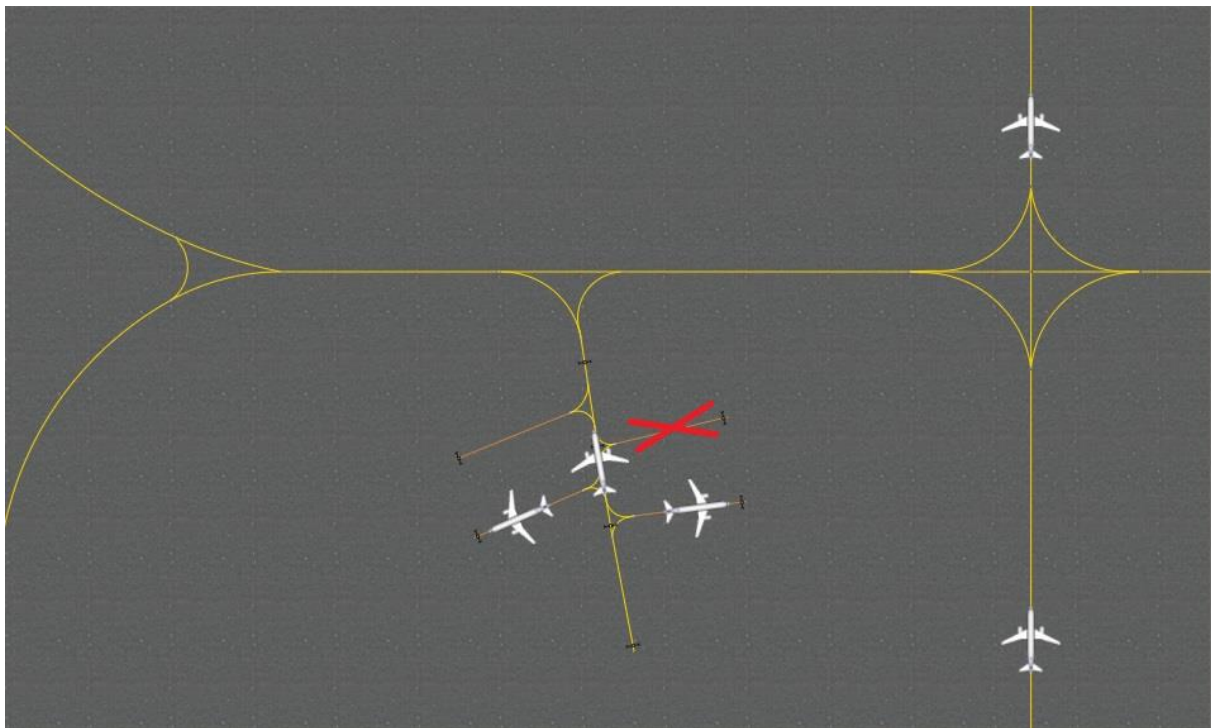
Cílem bylo poukázat na možnosti využití modelu v rámci konkrétních bezpečnostních analýz pro případné potřeby Letiště Václava Havla v Praze.

Jednotlivé scénáře:

- Změna směru jízdy letadel
- Uzavření několika stání v zálivu
- Zvyšování intenzity
- Zvyšování po sobě jdoucích konfliktních segmentů

Na nově vyvinutém modelu lze ukázat a simulovat několik událostí. První je změna směru pojíždění v celém modelu. V tomto případě se ze vstupů stanou výstupy a naopak a otočí se směr pojíždění letadel. Je zde potřeba dbát zvýšené bezpečnosti v momentě změny, tedy kdy letadla záměrně pojíždějí proti sobě, jelikož je na chvíli směr pojíždění obousměrný ve všech částech infrastruktury. Omezením bude celkový průtok infrastruktury v době změny provozu, tedy v momentě, kdy letadla na odlet pojíždí na obě strany a letadla z příletu jedou též z obou stran. Tento výsledek by měl být znázorněn pomocí dat času. Model generuje časy celého průjezdu infrastrukturou a časy zpoždění.

Druhou událostí jsou infrastrukturní změny. Například uzavření prvního stání na pravé straně v zálivu při rekonstrukci. Po celou dobu rekonstrukce zde letadla nesmí zajiždět a je potřeba stavebního opatření. Dalším omezením bude vytlačení letadla ze stání na druhé straně, letadlo nebude mít tolik prostoru jako když rekonstrukce neprobíhá. Je potřeba dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k poškození letadla. V případě uzavření stání může být na chvíli občasně vyřazena přiléhající cesta a může dojít ke změně toků letadel, budou více vytěžovány ostatní stání a v případě chvilkového uzavření přilehlé dráhy by mohlo dojít ke zhuštění provozu na jiných místech. V horších případech by mohlo dojít k časově delšímu pojíždění. V ještě více eskalovaném scénáři by mohlo dojít ke ztrátě SLOTu a velkému zpoždění odletu.



*Obrázek 5.1 – Vizualizace uzavření stání*

Třetím scénářem je zvyšování intenzity provozu, kdy v modelu je nastaveno 5 intenzit, ale po menší úpravě je možné zavést ještě specifické intenzity provozu po jednotkách letadel, případně snížení nejmenší nastavené intenzity nebo naopak zvýšení největší nastavené intenzity, kdy je možné zkoumat nejvyšší kapacitu dané infrastruktury. Při snížení intenzity by nemělo dojít k žádnému problému, ba naopak by na veškeré procesy mělo být mnohem více času i místa. V případě opačném, kdy by byla nastavena ještě vyšší intenzita by mohlo dojít opět ke zhuštění provozu a různým zpožděním, mohly by se tvořit delší fronty před vstupem na dráhu, letadla by odlétala se zpožděním a opět by mohlo dojít ke ztrátě SLOTu a financím například při odloženém odletu na další den. Tato skutečnost by se měla objevit na delším časovém úseku stráveném v pojezdovém systému.

Čtvrtým scénářem je zvyšování nebo snižování počtu po sobě jdoucích segmentů. Nyní je v modelu nastavena možnost žádného, jednoho nebo dvou po sobě jdoucích konfliktních segmentů. Tento počet je možno zvýšit. K výsledným závěrům by měla přispět data, která se v modelu hodnotí a těmi jsou čas strávený v infrastruktuře a počet pomyslného zastavení letadla, tedy kolikrát letadlo dávalo jinému letadlu přednost z důvodu konfliktních segmentů. Při zvýšení počtu po sobě jdoucích konfliktních segmentů je předpoklad, že by mohlo dojít ke

snížení propustnosti infrastruktury. Na výsledných datech by se tato skutečnost mohla projevit zvýšeným počtem udělených povolení a zvýšeným čase stráveném v pojezdovém systému.

Tyto výše zmíněné simulované situace je možno s menšími úpravami modelu nasimulovat a jsou předmětem bezpečnostní studie, kde se generují konkrétní data, která se dají využít pro identifikaci nebezpečí, nebo hodnocení rizika. Těmi daty v tomto nově vyvinutém modelu jsou čas průjezdu infrastrukturou, čas zpoždění v zálivu a počet udělených povolení, tedy počet kolikrát muselo letadlo dát jinému letadlu přednost.



## 6 Závěr

Cílem práce bylo vytvoření simulačního modelu řízení letového provozu v procesu pojíždění letadel na letišti Václava Havla v Praze a na závěr ohodnotit model a jeho výsledné analýzy v rámci bezpečnostních studií. Model ATC se značí tím, že vykazuje ucelený soubor procesů, nebo úkonů, které jsou v kompetenci řídicích letového provozu, nebo jsou na ně úzce vázány a potřebují jejich souhlas.

V rámci vyhotovení práce bylo potřeba analyzovat předchozí studie, které simulovaly určité procesy řízení letového provozu. Dále byla podrobně prostudována služba řízení letového provozu s ohledem na jednotlivá stanoviště a příslušná pracoviště a jejich povinnosti, které jsou povinni v rámci profese vykonávat. Na základě těchto studií byly vyhodnoceny procesy, které byly v rámci simulace namodelovány. Pro simulování modelu byla vybrána metoda multiagentního modelování, která splňovala potřebné atributy pro vyhotovení modelu. V rámci tohoto výběru byl samotný model zhotoven v programovacím prostředí AnyLogic.

Vybrané procedury byly nasimulovány a jejich funkčnost a užití patřičně okomentovány. Dále bylo vybráno dvacet provozní scénářů, u kterých se měnil počet po sobě jdoucích konfliktních segmentů, měnila se intenzita nasimulovaného provozu a pro každý jeden scénář byly vybrány jiné vstupy a výstupy. Tyto scénáře prokázaly, že celkový čas průjezdu nasimulované části systému, čas jízdy letadel směřujících na odlet, čas letadel směřujících z příletu, doba zdržení v zálivu a průměrný počet udělených povolení se se zvyšující se intenzitou a zvyšujícím se počtem konfliktních segmentů exponenciálně narůstal.

Po vyhodnocení výstupů z modelu byla práce zaměřena na porovnání složky ATC s již existujícím modelem. Největší změnou je přístup k simulování této složky. V již existujícím modelu se konflikty řešily lokálně na úrovni infrastruktury. Nově vyvinutý model tyto konflikty řeší obecně na úrovni agentů, kteří spolu kooperují a v rámci nastavení předepsaných pravidel se snaží předejít potenciálním kolizím. Model je vyhotoven přístupem obecného řešení všech procesů na úrovni agentů.

Výsledky jsou okomentovány v rámci implementace do modelu s infrastrukturou Letiště Václava Havla, kde jsou jasně pojmenována úskalí nasimulovaného modelu a potřebné rozšíření v rámci integrace. V logické části modelu je potřeba rozšíření o sofistikovanější

algoritmus při výběru vhodné trasy. Dále je nutné rozšíření algoritmu pro jednotlivé zálivy v rámci složitosti a vysokého počtu kombinací s dalšími procesy, které jednotlivé zálivy nabízí. Určitě je potřeba prohloubit proces rozhodování v křižovatkách, kde byly vymyšleny dva možné způsoby. Prvním způsobem je nastavení kritérií, která by pouze rozhodovala o prvenství průjezdu letadla. Druhým způsobem je navolení vah priorit, kde by každé letadlo dle jeho hodnoty dostalo určitou prioritu, která by opět určovala přednosti v křižovatkách. Druhá varianta je o něco složitější, ale na druhou stranu by si efektivněji poradila v případě příjezdu více než dvou letadel najednou. Na závěr je potřeba rozšíření modelu o další agenty, kteří by se staraly o další nespecifikované a konkrétní úseky na Letišti Václava Havla. Určitě by si vlastního agenta zasloužily jednotlivé sjezdy z dráhy na pojezdové plochy. Vhodné by taktéž bylo zavedení separátních agentů reprezentujících stání (průjezdná nebo nose-in), odmrazovací plochy by si též zasloužily svého agenta. Tímto by se agentní řízení rozšířilo a mohlo by snáze pokrýt celou infrastrukturu letiště.

V rámci poslední problematiky byly navrženy čtyři scénáře, na kterých byla ukázána schopnost využití modelu v rámci bezpečnostních studií. Tyto čtyři scénáře prokázaly možnost využití dat generovaných současným modelem a model jako takový k identifikaci možného nebezpečí, nebo hodnocení rizika v reálném prostředí Letiště Václava Havla.

Cíl práce byl splněn s menší limitací rozsahu grafického zpracování modelu, a tedy nenasimulování celého letiště z důvodu velké komplikovanosti technického řešení procesů v modelu v rámci infrastruktury na Letišti Václava Havla. Dále by bylo potřeba získat data z komunikace mezi řídicími a piloty, nebo minimálně mít časy všech udělených povolení.

V práci byly určité procesy spadající do vykonávaných povinností řídicích v letovém provozu nasimulovány tak, aby se jednalo o model řízení letového provozu, který se snaží eliminovat dobu zpoždění na co možná nejmenší a zároveň udržet nízký počet udělených povolení. Byla snaha o bezproblémový průjezd danou infrastrukturou, který by se co nejvíce přiblížil reálnému prostředí. V práci je tento fakt ukázán, jen oproti reálnému prostředí je zapotřebí do modelu vložit i oči a mysl řídicího letového provozu, kdy je toto nahrazeno komunikací agentů, kteří jsou zavedeny v podobě různých algoritmů. Dále model potřebuje pro všechny situace zakomponování možných rizik konfliktů a nezdařených situací a také je vždy potřeba mít záložní plán, aby nedošlo k zastavení simulace.

## Seznam použité literatury

- [1] Letiště Václava Havla Praha v létě odbavilo přes 3,8 milionů cestujících. *Prg.aero* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/letistem-vaclava-havla-praha-v-lete-proslo-38-milionu-cestujicich>
- [2] SAIFUTDINOV, Farid, Ilya JACKSON a Jurijs TOLUJEVS. Scenario Modeling in a Centralized Airport Ground Traffic Control System. In: KABASHKIN, Igor, Irina YATSKIV a Olegas PRENTKOVSKIS, ed. Reliability and Statistics in Transportation and Communication [online]. Cham: Springer International Publishing, 2021, s. 184-193 [cit. 2023-08-30]. Lecture Notes in Networks and Systems. ISBN 978-3-030-68475-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-68476-1\_17
- [3] SAIFUTDINOV, Farid, Ilya JACKSON, Jurijs TOLUJEVS a Tatjana ZMANOVSKA. Digital Twin as a Decision Support Tool for Airport Traffic Control. In: *2020 61st International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS)* [online]. IEEE, 2020, 2020-10-15, s. 1-5 [cit. 2023-08-30]. ISBN 978-1-7281-9105-8. Dostupné z: doi:10.1109/ITMS51158.2020.9259294
- [4] LIMIN, Shi, Pham DUE-THINH a Sameer ALAM. Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Mix-mode Runway Sequencing. In: *2022 IEEE 25th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* [online]. IEEE, 2022, 2022-10-8, s. 586-593 [cit. 2023-08-30]. ISBN 978-1-6654-6880-0. Dostupné z: doi:10.1109/ITSC55140.2022.9922221
- [5] Yu Jiang, Xinxing Xu, Honghai Zhang, Yuxiao Luo, "Taxiing Route Scheduling between Taxiway and Runway in Hub Airport", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, Article ID 925139, 14 pages, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/925139>
- [6] GAO, Wei a Siying XU. Multi-Airport System Simulation and Optimization Research. In: *2009 International Conference on Electronic Computer Technology* [online]. IEEE, 2009, s. 698-701 [cit. 2023-08-30]. ISBN 978-0-7695-3559-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICECT.2009.61

- [7] COULURIS, George J., Robert K. FONG, Michael B. DOWNS, Nathan MITTLER, David SIGNOR, Ari STASSART a Thomas HSIAO. A new modeling capability for airport surface traffic analysis. In: *2008 IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference* [online]. IEEE, 2008, 3.E.4-1-3.E.4-11 [cit. 2023-08-30]. ISBN 978-1-4244-2207-4. Dostupné z: doi:10.1109/DASC.2008.4702818
- [8] SOLDÁN, Vladimír. *Letové postupy a provoz letadel*. Jeneč: Letecká informační služba Řízení letového provozu České republiky, 2007. ISBN 978-80-239-8595-5.
- [9] *Airguru* [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://www.airguru.cz/clanky/rozdeleni-vzdusneho-prostoru-ii>
- [10] *Směrnice pro výkon služby na TWR Ruzyně. Verze:14.0. Praha, 2023.*
- [11] *Letová informační příručka: AD 2–LKPR–I* [online]. 2022 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: [https://aim.rlp.cz/ais\\_data/aip/data/valid/a2-pr-txt2.pdf](https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/a2-pr-txt2.pdf)
- [12] *Směrnice Řízení provozu na odbavovací ploše SEVER. Verze:1.10. Praha, 2023.*
- [13] *Odmrazování letadel na LKPR*. Letiště Praha, 2021.
- [14] Agent Based Modeling [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.anylogic.com/use-of-simulation/agent-based-modeling/>
- [15] SHIFFMAN, Daniel. *The nature of code: simulating natural systems with processing*. Version 1.0, generated December 6,2016. New York: Free Software Foundation, 2012. ISBN 978-0985930806.
- [16] *Airfield modelling – state of the art* [online]. 2010 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/267833706\\_Airfield\\_modelling\\_-\\_state\\_of\\_the\\_art](https://www.researchgate.net/publication/267833706_Airfield_modelling_-_state_of_the_art)
- [17] HAD, Petr. *Hodnocení propustnosti letištní infrastruktury a způsobených zpoždění letadel*. Praha, 2021. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze - fakulta dopravní.
- [18] *Výroční zpráva 2021 - prg.aero* [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/vyrocní->

[zpravy?fbclid=IwAR3vzYdMT3hQiBLDMAWiFpBOwHXJ2FfP3EvyoqPWODuD1VpzeV\\_IJMy5ho0](https://www.anylogic.com/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/)

[19] *The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 8* [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://www.anylogic.com/resources/books/big-book-of-simulation-modeling/>

[20] *Prg.aero* [online]. [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: [www.prg.aero/safety-management-system](http://www.prg.aero/safety-management-system)

[21] *SkyBrary* [online]. [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/safety-management-system>

[22] *SafetyCulture* [online]. [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: [www.safetyculture.com/topics/safety-management-system/](http://www.safetyculture.com/topics/safety-management-system/)

[23] *Caa* [online]. [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: [https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2019/07/SMS\\_provozovatele\\_NCCaSPO2-2.pdf?cb=2cbca4dd0f3ccb9e9feb19f3a86ff3ae](https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2019/07/SMS_provozovatele_NCCaSPO2-2.pdf?cb=2cbca4dd0f3ccb9e9feb19f3a86ff3ae)

[24] *ICAO: Safety Management Manual (SMM). Doc. 9859* [online]. In: . Montreal, 2013 [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5863.pdf>

[25] *SkyBrary* [online]. [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/management-change>

[26] *Tableau* [online]. [cit. 2023-08-27]. Dostupné z: <https://www.tableau.com/learn/articles/root-cause-analysis>

[27] *AIP - AD2 - LKPR* [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: [https://aim.rlp.cz/ais\\_data/aip/data/valid/a2-pr-adc.pdf](https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/a2-pr-adc.pdf)

[28] STOLZER, Alan J, Robert L SUMWALT a John J GOGLIA. *Safety Management Systems in Aviation* [online]. Boca Raton: CRC Press, 2023 [cit. 2023-08-30]. ISBN 9781003286127. Dostupné z: doi:10.1201/9781003286127