



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Milan Badal

**SIMULAČNÍ PLATFORMA PRO HODNOCENÍ
PROPUSTNOSTI DRÁHOVÉHO SYSTÉMU NA LKPR
SIMULATION PLATFORM FOR ASSESSMENT OF
THE RUNWAY SYSTEM THROUGHPUT AT LKPR**

Diplomová práce

2024



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Milan Badal

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Simulační platforma pro hodnocení propustnosti dráhového systému na LKPR**

Název tématu (anglicky): Simulation Platform for Assessment of the Runway System Throughput at LKPR

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je vytvořit simulační model stávajícího dráhového systému na Letišti Václava Havla Praha a ohodnotit propustnost této infrastruktury na základě definovaných scénářů.
- Proveďte analýzu současného stavu dráhového systému na Letišti Václava Havla Praha.
- Určete základní parametry a procesy/postupy, které mají dopad na propustnost dráhového systému.
- Vytvořte simulační model provozu letadel na definované infrastruktuře.
- Proveďte simulační analýzu na základě definovaných provozních scénářů.
- Diskutujte výsledky z pohledu letištního provozu.



- 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: CS-ADR-DSN Aerodrome Design
Norman J., Ashford, Salej Mumayiz, Paul H. Wright.:
Airport Engineering: Planning, Design and Development of 21st Century Airports, 4th Edition
Airport Capacity Assessment Methodology (ACAM) Manual

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

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2022**
(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: **15. května 2024**
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. Milan Badal
jméno a podpis studenta

V Praze dne 1. prosince 2023



Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucím mé práce, kterými byli Ing. Slobodan Stojčić, Ph.D. a Ing. Petr Had, za odborné vedení závěrečné práce. Poděkování pak patří hlavně Ing. Janě Kuklové, Ph.D. z laboratoře LAMbDA za pomoc při tvorbě simulačního modelu v rámci diplomové práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem, kteří mě podporovali v průběhu celého studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc. a NM studiu.

Nemám závažný důvod proti užívání 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 10. května 2024

podpis



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

SIMULAČNÍ PLATFORMA PRO HODNOCENÍ PROPUSTNOSTI DRÁHOVÉHO SYSTÉMU
NA LKPR

diplomová práce

květen 2024

Bc. Milan Badal

Abstrakt

Hlavním cílem této diplomové práce je zhodnotit propustnost dráhového systému na Letišti Václava Havla Praha. Pro naplnění tohoto cíle byla provedena analýza současného stavu dráhového systému na tomto letišti v Praze a byly určeny procesy a parametry, které mají dopad na propustnost dráhy. Součástí práce je analýza dat z reálného provozu za účelem správného nastavení simulačního modelu. Výsledný model je nástrojem pro splnění hlavního cíle, a tedy určení dráhové kapacity. Pro provedení simulace bylo vytvořeno potřebné množství provozních scénářů, na kterých byla zároveň se simulací demonstrována i funkčnost modelu. Výsledky simulace byly na konci práce diskutovány.

Klíčová slova

Simulační platforma, dráhová kapacita, propustnost dráhového systému, letiště



SIMULATION PLATFORM FOR ASSESSMENT OF THE RUNWAY SYSTEM THROUGHPUT
AT LKPR

master thesis

May 2024

Bc. Milan Badal

Abstract

The main aim of this master thesis is to evaluate the runway throughput at Václav Havel Airport Prague. In order to fulfill this main aim, an analysis of the current state of the runway system and infrastructure at this airport in Prague was made, and the processes and parameters that have an impact on runway throughput were determined. Part of the thesis is the analysis of data from real-time operation in order to correctly set the simulation model. The resulting model is a tool for fulfilling the main aim of this thesis, and thus determining of the runway capacity. To carry out the simulation, the necessary number of operational scenarios were created. Based on these scenarios the functionality of the model was demonstrated at the same time as the simulation. The results of the simulation were discussed on the last pages of this thesis.

Key words

Simulation platform, Runway capacity, Runway system throughput, Airport



Seznam zkratek

- ADS-B – Automatic Dependent Surveillance Broadcast (Závislé sledování letadla)
- AIP – Aeronautical Information Publication (Letecká informační příručka)
- AOBT – Actual Off Block Time (Aktuální čas zahájení vytlačení letadla)
- ASDA – Accelerate and Stop Distance Available (Dostupná dráha pro zastavení)
- ATC – Řízení letového provozu (Air Traffic Control)
- ATM – Air Traffic Management (Řízení letecké dopravy)
- ATS – Air Traffic Services (Letové provozní služby)
- CAA – Civil Aviation Authority (Úřad civilního letectví)
- CAT – Approach Category (Kategorie přiblížení)
- CTOT – Calculated Take Off Time (Vypočítaný čas vzletu)
- FAF – Final Approach Fix (Bod konečného přiblížení)
- FL – Flight Level (Letová hladina)
- GP – Glide Path (Sestupová rovina)
- HIRO – High Intensity Runway Operations (Provoz na dráze za vysoké intenzity)
- IAF – Initial Approach Fix (Bod počátečního přiblížení)
- IATA – International Air Transport Association (Asociace pro civilní letectví)
- ICAO – International Civil Aviation Organization (Mezinárodní organizace pro civilní letectví)
- IFR – Instrument Flight Rules (Pravidla letu podle přístrojů)
- ILS – Instrument Landing System (Systém pro přesné přístrojové přiblížení)
- IMC – Instrument Meteorological Conditions (Meteorologické podmínky pro let podle přístrojů)
- LDA – Landing Distance Available (Dostupná vzdálenost pro přistání)
- LNAV – Lateral Navigation (Laterální navigace)
- LOC – Localizer (Kurzový maják)
- LPV – Lateral Performance with Vertical Guidance (Laterální výkonnost s vertikálním vedením)
- LVTO – Low Visibility Take Off (Vzlet za snížené dohlednosti)



LVO – Low Visibility Operations (Postupy za snížené dohlednosti)

METAR – Meteorological Aerodrom Report (Letištní hlášení meteorologických podmínek)

MLAT – Multilateration (Sledování pozice na základě multilaterace)

MTOW – Maximum Take Off Weight (Maximální vzletová hmotnost)

NDB – Non-directional Beacon (Nesměrový radiomaják)

NM – Network Manager (Síťový manažer)

RET – Rapid Exit Taxiway (Pojezdová dráha pro rychlé odbočení)

RNAV – Area Navigation (Prostorová navigace)

RNP – Required Navigational Performance (Požadovaná navigační přesnost)

RVR – Runway Visual Range (Dráhová dohlednost)

RVSM – Reduced Vertical Separation Minima (Snížená vertikální separace)

RWY – Runway (Dráha určená pro vzlety a přistání letadel)

RWYCC – Runway Condition Code (Kód stavu dráhy)

TAF – Terminal Aerodrome Forecast (Letištní předpověď počasí)

TMA – Terminal Control Area (Koncová řízená oblast)

THR – Threshold (Práh dráhy)

TOBT – Target Off Block Time (Cílený čas zahájení vytlačení letadla)

TODA – Take Off Distance Available (Dostupná dráha pro vzletu)

TORA – Take Off Run Available (Dostupná dráha pro rozjezd)

TSAT – Target Start Up Time (Cílený čas zahájení spouštění motorů)

TWY – Taxiway (Pojezdová dráha)

UTC – Universal Coordinated Time (Univerzální koordinovaný čas)

VFR – Visual Flight Rules (Pravidla pro let za viditelnosti)

VNAV – Vertical Navigation (Vertikální Navigace)

VOR – VHF Omni Radio Range (VKV všesměrový radiomaják)



Obsah

Úvod	9
1. Kapacita letiště	11
1.1. Propustnost RWY	13
2. Letištní infrastruktura letiště Praha (PRG/LKPR).....	16
3. Faktory ovlivňující propustnost dráhového systému	23
3.1. Faktory provozu letiště Praha (LKPR)	23
3.1.1. High Intensity Runway Operations.....	23
3.1.2. Postupy pro omezení hluku při nočním provozu	24
3.1.3. Preferenční systém použití RWY na LKPR	24
3.1.4. Postupy za snížené dohlednosti	25
3.2. Faktory řízení letového provozu (ATC)	26
3.2.1. Rozestupy mezi letadly	26
3.2.2. Rychlostní restrikce	28
3.3. Faktor počasí.....	29
3.3.1. Počasí ovlivňující let	29
3.3.2. Počasí ovlivňující pohyb po dráze.....	30
3.4. Faktory ovlivňující propustnost z pohledu letadla.....	32
3.4.1. Kategorie letadla.....	32
3.4.2. Hmotnost letadla.....	34
3.4.3. Faktory ovlivňující délku dráhy pro vzlet	35
3.4.4. Faktory ovlivňující délku dráhy pro přistání	36
4. Literární rešerše.....	37
5. Simulační platforma	43
5.1. AnyLogic – teorie.....	43
5.1.1. Agentní modelování.....	44
5.2. AnyLogic – model.....	45
5.2.1. Popis Modelu.....	45
5.2.2. Grafická část.....	48



5.2.3. Logická část.....	49
5.3. Data pro simulaci.....	57
6. Simulace a Validace	62
6.1. Přílety	62
6.2. Odlety.....	63
6.3. Kombinace příletů a odletů v poměru 50:50 na dráhu 24.....	64
6.4. Kombinace příletů a odletů v poměru 50:50 na dráhu 06.....	65
6.5. Přílety a odlety s reálným provozem.....	66
7. Diskuse.....	71
8. Závěr	74
Seznam použité literatury	76
Seznam obrázků.....	78
Seznam tabulek.....	79



Úvod

Letectví se dá označit jako fenomén dnešní doby. Dnešní svět si lze jen těžko představit bez něj a zároveň je otázkou, zda by to bylo vůbec možné. Letecká doprava tvoří nenahraditelnou formu dopravy, díky které je možné se v rámci několika hodin pohybovat na velké vzdálenosti.

Vzhledem k tomu, že na letectví jako celek je soustředěna velká pozornost společnosti, je nutné, aby všechny jednotlivé složky vzájemně fungovaly, a to zejména tak, aby byla zachována ta nejvyšší bezpečnost provozu.

Jednu složku letecké společnosti tvoří samotní letečtí provozovatelé. Tyto subjekty zabezpečují přímo přepravu lidí a nákladu. Není třeba diskuse o tom, že pro zachování důvěryhodnosti letecké dopravy jako celku je třeba, aby zejména tato část leteckého provozu byla kvalitou a bezpečností na vysoké úrovni tak, aby v lidech vzbuzovala značnou dávku důvěryhodnosti.

Další složkou je pak řízení letového provozu, jehož kooperace s leteckými dopravci formou řízení samotných letadel jak ve vzduchu, tak i na zemi zvyšuje úroveň bezpečnosti natolik, že v případě komerční letecké dopravy je tato kooperace neodmyslitelná. Jednoduše řečeno v dnešní době je standardní koordinace komerční letecké dopravy složkou řízení letového provozu. Výjimku pak tvoří takzvaná neřízená letiště. Jedná se o menší letiště s méně intenzivním provozem, kde právě z tohoto důvodu není poskytována služba řízení letového provozu.

V neposlední řadě nesmí být zapomenuto na pozemní část letecké dopravy. Jedná se o všechny subjekty zajišťující veškerý servis pro letadla ve chvíli, když jsou na zemi, a tedy o samotné odbavení letadel. V dnešní době, kdy je hlavní snahou maximálně vytížit letadlo tak, aby trávilo co nejvíce času ve vzduchu, a tedy vydělávalo, je nutné, aby právě odbavení na zemi bylo co nejrychlejší a nevznikala zbytečná zpoždění.

Je zřejmé, že subjektů, které musí mezi sebou kooperovat, aby byla zajištěna dostatečná spolehlivost a bezpečnost, je větší množství, než zde bylo zmíněno. Avšak ke vzájemné kooperaci právě těchto zmíněných subjektů dohromady dochází na letišti, a proto byly právě tyto tři segmenty zmíněny.

Právě na letišti je velmi důležité, aby tyto segmenty spolupracovaly efektivně a bezchybně. V případě malého letiště se tato úloha nejeví jako moc složitá, avšak pokud se jedná o prostředí velkého letiště s hustým provozem, je již tato problematika komplikovanější. V případě českého leteckého prostředí je největším letišťem, kde je možné kooperaci těchto segmentů pozorovat, Letiště Václava Havla Praha.



Cílem této diplomové práce je hodnocení propustnosti dráhového systému na letišti v Praze (PRG/LKPR). V tomto případě, kdy se jedná o velké mezinárodní letiště, je potřeba mít údaje o kapacitě letiště. Maximální hodinová propustnost je důležitým indikátorem pro letiště. Díky tomuto údaji letiště může dopředu plánovat provoz s ohledem na kapacitu tak, aby nedošlo k nahromadění letadel ve vzduchu nebo na zemi, a tedy aby tak nevznikala možná zpoždění letadel.

Hlavním cílem tedy bude zhodnocení propustnosti dráhového systému na letišti v Praze. Nástrojem pro hodnocení propustnosti bude model, který na základě nastavených parametrů dokáže vyhodnotit kapacitu v závislosti na definovaných simulačních scénářích.

Motivací pro zpracování tohoto tématu je zjištění kapacity dráhového systému, což by mělo být i výsledkem této práce. Díky tomuto výsledku a jednotlivým scénářům se očekává, že díky simulaci vyplynou možná řešení provozu na letišti, která povedou ke zvýšení kapacity dráhového systému, a zároveň dojde k objasnění, jaké parametry výslednou kapacitu přímo ovlivňují.

Dalším důvodem pro zpracování tohoto tématu je možnost integrace vytvořeného modelu do celkového modelu letiště, čímž se zabývá právě projekt Moderní trendy rozvoje letišť na Fakultě dopravní ČVUT. Celkový model, složený z jednotlivých částí letiště, by měl sloužit k hodnocení kapacity letiště jako celku.

Principem zpracování této práce bude nadefinování různých provozních scénářů, následně pak budou zhodnoceny výsledky simulace těchto scénářů. Pro samotnou simulaci bude použita simulační platforma Anylogic.

V této platformě kromě výsledků bude možné i sledovat propustnost jednotlivých drah a vzájemně ji mezi dráhami porovnat, díky čemuž bude možné například určit, jak systém sjezdů a nájezdů na dráhu ovlivňuje výsledky simulací. Pokud by byla potřeba zvýšit dráhovou propustnost, je možné ve vzniklém modelu například upravit polohu vjezdů a výjezdů tak, aby došlo ke zvýšení kapacity.

Všechny zmíněné výstupy této práce jsou závislé na vstupních datech a také na dostupnosti požadovaných dat. V souvislosti se získanými daty je důležité nastavení parametrů modelu tak, aby výsledky simulace byly validní.



1. Kapacita letiště

Pro pochopení problematiky, kterou řeší tato diplomová práce, je nezbytné nejprve definovat, co to je kapacita letiště. Pro úplnost je třeba vymežit dva odlišné pojmy, kterými jsou kapacita (capacity) a výkonnost (efficiency). Výkonnost, na rozdíl od kapacity, hodnotí provoz letiště na základě indikátoru tzv. on-time performance, tedy podle doby zpoždění. Kapacita letiště jako celku je však závislá na vzájemné spolupráci mezi jednotlivými letištními systémy. [1, 2]

Kapacita obecně je měřena podle výkonových ukazatelů během definovaného časového období. Může být definována jako počet pohybů letadel za jakýkoliv časový úsek. Může to být za minutu, za 2 hodiny anebo i jiná varianta. Nejčastěji je však kapacita vyjádřena jako počet pohybů letadel za hodinu. [1, 2]

Z pohledu provozovatele letiště je určujícím parametrem maximální kapacita letiště. Na základě tohoto parametru je pak možné distribuovat sloty na letišti mezi dopravce.

S kapacitou letiště je spojen i termín propustnost. Tyto dva termíny jsou na sobě závislé. Čím větší je propustnost jednotlivých částí letiště, a tedy i letiště jako celku, tím větší je pak kapacita letiště.

Kapacita letiště, tedy počet pohybů během daného časového úseku, je definována na základě stanovených parametrů. Se základní metodou měření maximální kapacity souvisí následující rozdělení [2]:

- Praktická kapacita
- Deklarovaná kapacita
- Udržitelná kapacita

Jak již bylo zmíněno, kapacita může být měřena pomocí různě stanovených indikátorů. Například ICAO pro hodnocení letištní kapacity definovalo odlišné indikátory, kterými jsou [1]:

- Maximální počet pohybů za hodiny
- Maximální počet pohybů za den
- Průměrná denní kapacita

Je evidentní, že na základě definovaných indikátorů je kapacita letiště funkcí času. [1] Na základě těchto indikátorů je kapacita letiště rozdělena následovně:

- Strukturální
- Plánovaná
- Provozní



Výše zmíněné kapacity se liší časovým horizontem, na který jsou predikovány. Strukturální kapacita je definovaná pro nejdelší časový horizont, a to v řádu let. Díky této kapacitě je určena základní kapacita letiště z hlediska infrastruktury letiště pro účely obchodní činnosti.

Plánovaná kapacita je definovaná na základě očekávaného provozu v řádu měsíců a je podrobnější než strukturální kapacita. Plánovaná kapacita je pak vstupem pro NM, a tudíž pro procesy, které zahrnují koordinaci letových řádů jednotlivých dopravců tak, aby se předešlo možným přetížením jednotlivých letišť, vzdušných prostorů nebo jejich částí.

Provozní kapacita je nejpodrobněji zpracovaná ze všech zmíněných a bere se v úvahu pár dní před plánovaným provozem. Zahrnuje všechny aktualizace, které se týkají daného provozu a rovněž jako plánovaná kapacita je vstupem pro NM. [1, 2]

Je zřejmé, že kapacita letiště musí být definována, aby nedošlo k zahlcení letiště nebo jeho části nadměrným provozem. To se může stát v případě, kdy by byla překročena maximální kapacita. V takovém případě pak může docházet ke vzniku zpoždění provozu v jednotlivých částech dráhového, pojezdového nebo odbavovacího systému, což v reálném provozu bude mít za následek zpoždění letadel. To v krajním případě může znamenat, že letadla budou nucena divertovat na okolní letiště, jelikož jejich destinace nebude schopná toto letadlo vůbec přijmout před tím, než by se dostalo do stavu nízké hladiny paliva.

Kapacita letiště je nejvíce limitována částí pohybových ploch s nejmenší propustností. Pohybové plochy letiště se skládají ze 3 částí. Jednotlivými částmi jsou dráhový systém, systém pojezdových drah a odbavovací plochy.



1.1. Propustnost RWY

Tato diplomová práce se zabývá samotnou propustností dráhového systému na Letišti Praha/Ruzyně. Tato práce je zaměřena konkrétně na propustnost dráhového systému, která je definovaná jako počet pohybů letadel za hodinu. Propustnost dráhy a zároveň i celého dráhového systému, v případě většího počtu drah, je klíčovým ukazatelem pro dané letiště. Propustností dráhového systému je ovlivněna i kapacita letiště.

Maximální propustnost RWY závisí na více faktorech, mezi které patří například:

- Konfigurace drah
- Požadavky na separaci mezi letadly
- Počasí
- Kategorie letadla
- Řazení letového provozu
- Specifikace používaných drah
- Výkonnost ATM
- Enviromentální restrikce

Existuje několik způsobů, jak měřit propustnost dráhy. Všechny tyto metody by měly stanovit odhad počtu přiletů a odletů, které lze uskutečnit během jedné hodiny. [1, 2]

Propustnost samotné dráhy je náhodná proměnná, která může nabývat odlišných hodnot s měnícím se časem. Typická propustnost jedné dráhy je mezi 25 a 60 pohyby za hodinu.

Maximální propustnost dráhy závisí na skladbě letadel, kterými je využívána. V případě, kdy se v provozu budou vyskytovat převážně širokotrupá letadla, pak bude propustnost dráhy menší než v případě, kdy by stejnou dráhu využívala úzkotrupá letadla. Důvodem jsou požadavky stanovené předpisem ICAO Doc. 4444, v českém znění předpisu L 4444, který definuje minimální rozestupy mezi letadly jednotlivých hmotnostních kategorií. Rozdělení letadel do kategorií je detailně popsáno v kapitole 3 – Faktory ovlivňující kapacitu letiště.

V případě, kdy se provoz na jedné dráze skládá pouze z jedné kategorie letadel, se může propustnost dráhy lišit také, jelikož může dojít ke změně ostatních faktorů, kterými jsou aktuální vítr, dohlednost a další.

Z důvodu vysoké míry variability všech faktorů při určování nebo simulaci propustnosti dráhy či kapacity letiště, se může výsledek lišit od reálného provozu.

Maximální propustnost dráhy je definovaná jako maximální počet pohybů na dráze za jednu hodinu, aniž by byla porušena pravidla pro letový provoz. Dalším potřebným termínem je úroveň poskytovaných služeb. Tento termín definuje průměrnou dobu vyčkávání letadla při naplnění maximální kapacity. [1, 2]



Termín z předešlé kapitoly Praktická kapacita definuje maximální počet pohybů, který je možné poskytnout na dané dráze s průměrným zpožděním na jeden pohyb letadla v definované výši. Praktická kapacita je současně označena jako praktická hodinová kapacita a v této kapitole také praktická hodinová propustnost. Tento parametr tedy specifikuje limity pro určitou úroveň poskytování služeb. V momentě, kdy dojde k překročení tohoto limitu, tak dráhový systém dosáhl své kapacity. Praktická hodinová propustnost by měla odpovídat 80 % až 90 % maximální dráhové propustnosti. [1, 2]

Často se však stává, zpravidla na více frekventovaných letištích, že praktická hodinová propustnost přesahuje definovanou hodnotu, což znamená, že tato letiště operují nad svojí maximální kapacitou.

Z tohoto plyne, že úroveň poskytovaných služeb se s časem vyvíjí a v dnešní době by její hodnota měla být snížena tak, aby odpovídala trendu zvyšujícího se objemu provozu na letištích. Ve spojení s tím by pak následně byla odpovídající větší hodnota pro průměrné zpoždění.

Dalším pojmem z předchozí kapitoly je udržitelná kapacita. Ve spojitosti s dráhovým systémem letiště se dá o tomto parametru hovořit také jako o udržitelné propustnosti. Tento parametr udává počet pohybů za hodinu, které je možné obsloužit za delší časový úsek. [1, 2]

Udržitelná kapacita se stanovuje na základě kapacity ATM. V reálném provozu bude tento parametr odpovídat po sobě jdoucím hodinám. V ideálním případě by bylo žádoucí specifikovat tento parametr na dobu několika hodin, popřípadě dnů.

Na základě diskusí mezi příslušnými subjekty jsou v provozu stanovovány výkonnostní cíle. Tyto cíle specifikují propustnost dráhového systému na dobu několika hodin. Na základě výkonnostních cílů může být kapacita rozdělena do dvou kategorií:

- Udržitelná kapacita příletů
- Udržitelná kapacita odletů

Udržitelná kapacita běžně dosahuje hodnoty 90 % maximální propustnosti za provozu za příznivého počasí. Při zhoršených meteorologických podmínkách může tato kapacita dosahovat až 100 % maximální propustnosti dráhy.

Posledním pojmem z předešlé kapitoly je deklarovaná kapacita. Tento termín označuje počet pohybů na dráze za hodinu při udržení určité úrovně poskytovaných služeb. Tento parametr je nejvyužívanější ze všech zmíněných. Na základě deklarované kapacity jsou přiřazovány sloty a koordinovány časy letů. [1, 2]



Pro stanovení deklarované kapacity není využíváno žádného vzorce. Tuto hodnotu si každé letiště stanovuje samo na základě svých vlastních výpočtů. Tudíž je jasné, že výpočty deklarované kapacity se mohou lišit mezi jednotlivými letišti, a to i v rámci jedné země.

Měření maximální propustnosti dráhy je základním ukazatelem pro letiště. Měření tohoto ukazatele je prováděno v době, kdy se vytížení letiště blíží k jeho maximální kapacitě. Z toho důvodu lze měření provádět lépe u vytížených letišť než u letišť s nízkým provozem.

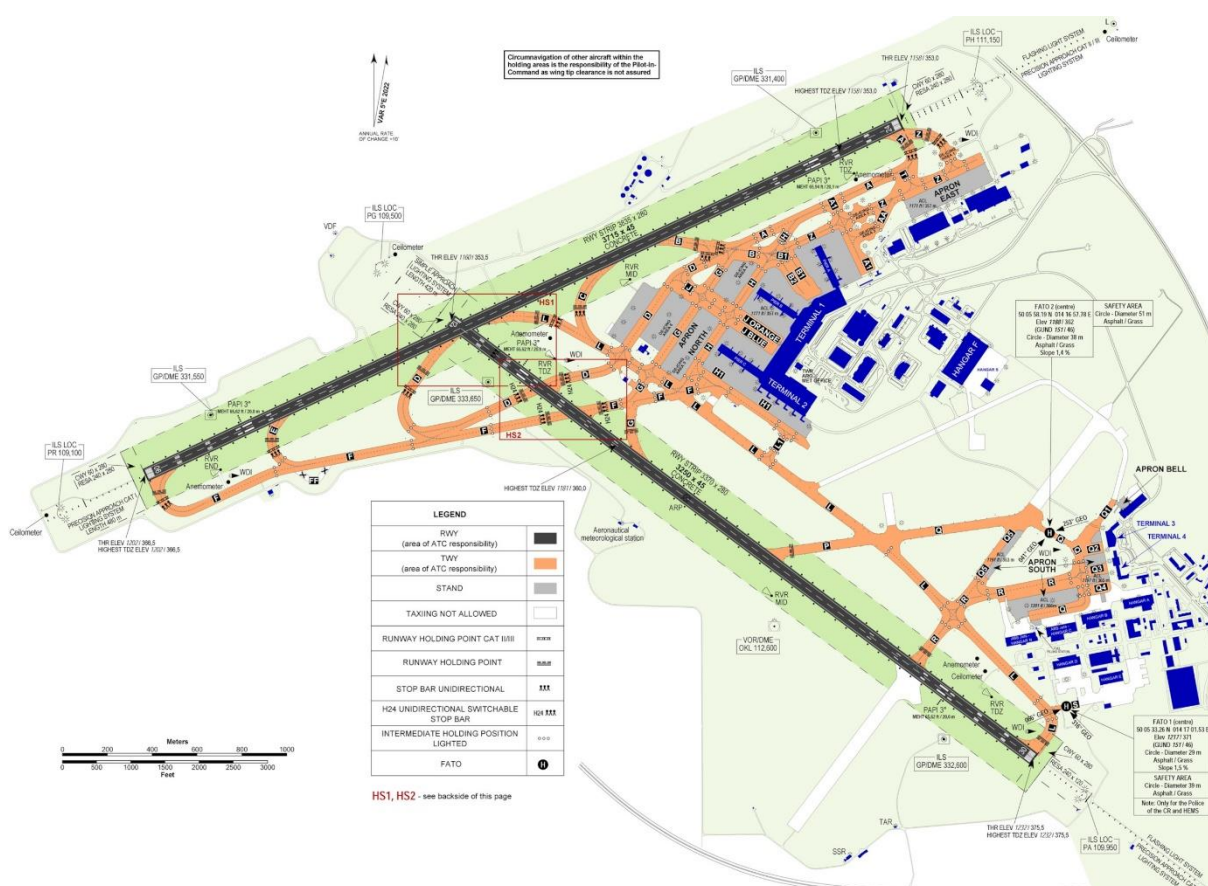
Měření maximální propustnosti dráhy je prováděno tím způsobem, že je při vysokém vytížení letiště počítán počet pohybů a k tomu se sleduje doba zpoždění jednotlivých letů. Výsledná data jsou následně využita pro stanovení výsledné hodnoty maximální dráhové propustnosti.

Pro plánovací účely letiště je tedy vhodné použít metody deklarované kapacity, udržitelné kapacity a praktické hodinové kapacity. U všech těchto metod se jedná o metody subjektivní, díky kterým může být kapacita vypočítána s poměrně velkou přesností. Pokud se v průběhu času průměrná vytíženost letiště blíží maximálním hodnotám, je zřejmé, že by bylo vhodné navýšit kapacitu letiště, popřípadě té části, ve které vytíženost dosahuje maxima.

Dalším způsobem, jak určit propustnost dráhy kromě odhadu anebo výpočtu, je simulace provozu. Tímto tématem se zabývá tato diplomová práce.

2. Letištní infrastruktura letiště Praha (PRG/LKPR)

Mezinárodní letiště Praha, nebo také Letiště Václava Havla Praha, je v České republice největší letiště. Největší je svojí rozlohou, ale zejména pak i kapacitou a objemem provozu. Kapacitou části letiště, konkrétně propustností dráhového systému, se zabývá tato diplomová práce. Status letiště Praha je veřejné mezinárodní letiště, certifikované pro VFR i IFR provoz s provozní dobou 24 hodin denně. IATA kód letiště je PRG a ICAO kód potom LKPR. Výška vztažného bodu letiště je 1234 stop neboli 376 metrů nad střední hladinou moře. Letiště je schopné odbavit největší letouny typu Airbus A380 nebo Boeing B747. Historicky se zde objevil i největší nákladní letoun Antonov An-225. [3]



Obrázek 1 Infrastruktura Letiště Praha.[3]

Z pohledu letištní infrastruktury se letiště dělí na dvě základní části. Těmi jsou vzdušná (Airside) a pozemní (Landside). [4] Pozemní část zahrnuje veškerou infrastrukturu, kterou používají cestující nebo zaměstnanci letiště před tím, než vstoupí do prostoru terminálu. Jedná se tedy o přístupové komunikace, parkoviště, veřejnou dopravu a další. Součástí Landside je i veřejná část terminálu. Pro účely této práce bude větší pozornost věnována vzdušné části letiště.



Vzdušnou část letiště je možné popsat za pomoci obrázku 1. Modrou barvou je vyznačen prostor terminálu. Na pražském letišti jsou k dispozici 3 terminály pro veřejnost. Terminál 3 slouží pro odbavování soukromých letů a nachází se v areálu starého letiště. Nejvíce využívané jsou pak terminály 1 a 2. Terminál 1 je využíván pro lety do zemí mimo schengenský prostor a Terminál 2 pak pro lety do zemí schengenského prostoru. Do vzdušné části není zařazen celý terminál, ale pouze vyhrazené prostory, které nejsou přístupné veřejnosti. Tedy se jedná o prostor za bezpečnostní kontrolou.

Dalšími částmi letiště jsou pohybové plochy [4]. Jak již bylo zmíněno v první kapitole, tyto části jsou:

- Dráha určená pro vzlet a přistání
- Pojezdové dráhy
- Odbavovací plochy

Odbavovací plochy slouží pro zajištění všech potřebných služeb pro letadlo, které přiletělo nebo bude odlétat. Pro tyto účely jsou na letišti zřízena odbavovací stání. V prostoru severní části letiště jsou zřízena stání 1 až 31 pro odbavení letadel přímo u terminálu a tato stání jsou vybavena nástupními mosty. Dále jsou na letišti dostupná odbavovací stání na odloučených stáních ve větší vzdálenosti od terminálu, kde se pro nástup a výstup cestujících používají schody. Tato stání jsou označena 50 až 58, 60 až 64 a 70 až 75. Pro odbavení nákladních letadel jsou dostupná stání E3 až E7 před cargo terminálem. V jižní části letiště jsou pak zřízena stání S1 až S26 pro odbavování soukromých letů.

Pojezdové dráhy slouží pro pohyb letadel mezi dráhou a odbavovacími plochami.

Dráhový systém letiště Praha disponuje 2 dráhami. Hlavní dráha 06/24 a vedlejší dráha 12/30. Z hlediska provozu existují určité limitace pro provoz na obou dráhách, které budou rozebrány v další kapitole. Důležité jsou pro přistávající a odlétající letadla informace o jednotlivých dráhách.

Tabulka 1 Parametry všech RWY na LKPR.

RWY	Magnetický směr dráhy [°]	Délka [m]	Šířka [m]
06	060	3715	45
24	240	3715	45
12	122	3250	45
30	302	3250	45



V tabulce 1 vidíme magnetický směr všech drah, jejich délku a šířku. Všechny tyto parametry jsou nutné k posouzení, zdali letadlo může dráhu využít. Nejsou to však jediné důležité parametry. Z hlediska výkonnosti letadel je nutné uvažovat i vyhlášené délky TORA, TODA, ASDA, LDA. [3, 4]

TORA je označení pro take off run available. Jedná se o vzdálenost, která může být použita pro rozjezd letadla při startu.

TODA znamená take off distance available. Jedná se o vzdálenost, která může být použita pro vzlet letadla. Rozdíl oproti údaji TORA je ten, že do délky pro vzlet může být započtena délka předpolí, která však je nepoužitelná pro rozjezd.

ASDA je zkratka pro accelerate – stop distance available. Jak již z anglického názvu vyplývá, jedná se o vzdálenost pro přerušovaný vzlet. Tato vzdálenost může být vyjádřena také jako TORA + dojezdová dráha. Pro dojezdovou dráhu může být využita vozovka s nižší únosností, než má samotná dráha.

Posledním zmíněným termínem bylo LDA neboli landing distance available. V praxi se jedná o použitelnou délku pro přistání.

Všechny tyto parametry jsou publikovány pro každou dráhu. V tabulce 2 jsou shrnuty všechny tyto parametry pro letiště v Praze. [3]

Tabulka 2 Vyhlášené délky drah na LKPR.

RWY	TORA [m]	TODA [m]	ASDA [m]	LDA [m]
06	3715	3775	3715	3715
24	3715	3775	3715	3715
12	3250	3310	3250	3250
30	3250	3310	3250	3250

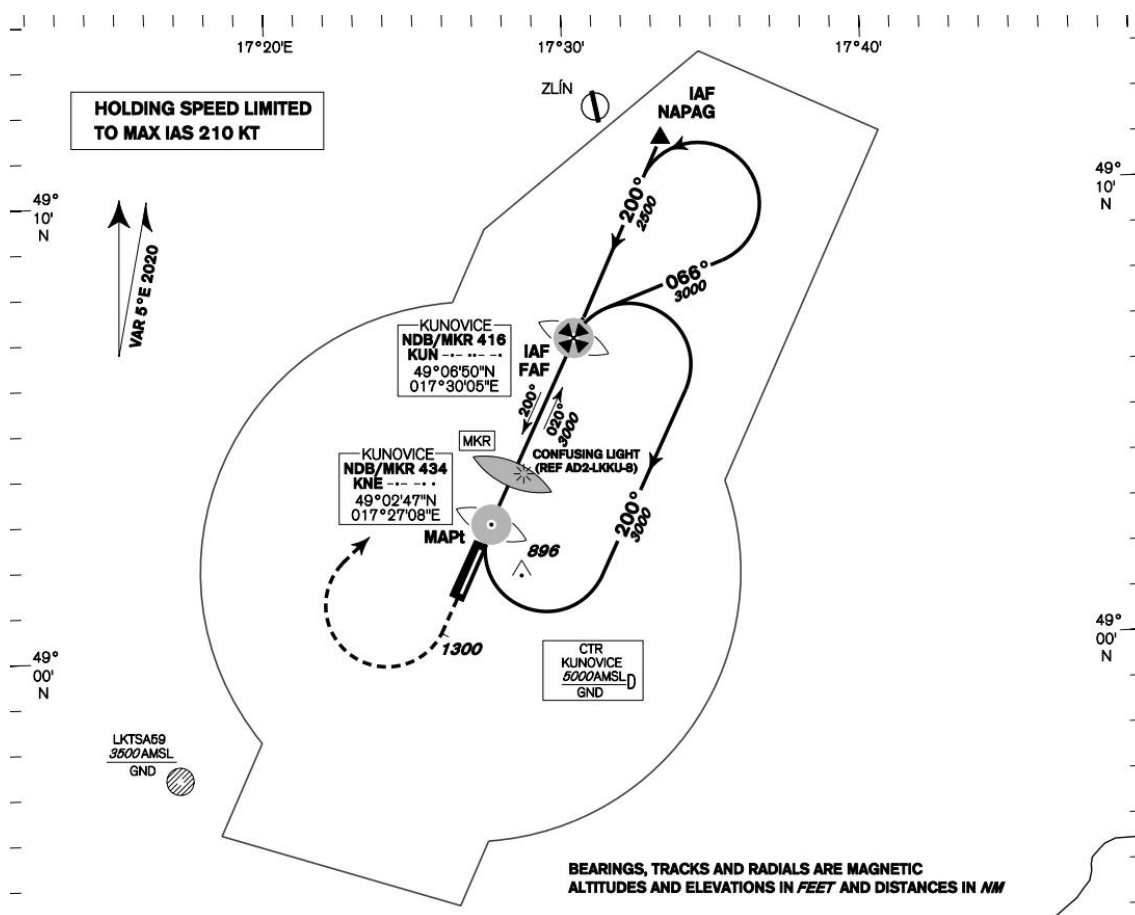
Pro úplnost je potřeba zmínit ještě pojmy clearway a stopway, které se vyskytly v textu v souvislosti s vyhlášenými délkami drah. Clearway označuje předpolí, což v praxi definuje prostor před anebo za dráhou, kde se nevyskytují žádné překážky a tento prostor slouží k dokončení vzdušné části vzletu do výšky 25 nebo 50 stop (podle stavu dráhy). Samotné předpolí může ve výpočtu pro vzlet tvořit maximálně polovinu celkové vzdálenosti pro vzlet (TODA). [4]

Druhým termínem byla stopway, neboli dojezdová dráha. Tato část umožňuje dojezd letadla v případě přerušovaného vzletu, ale sama nemůže být použita pro rozjezd.

Na začátku této kapitoly bylo zmíněno, že letiště je schváleno jak pro VFR, tak i pro IFR provoz. Naprostou většinu tvoří IFR provoz, tedy druh letu podle přístrojů. Výhodou tohoto druhu létání je, že letadla mohou létat i ve zhoršených meteorologických podmínkách neboli v IMC. Pro tento druh létání je potřeba, aby jak letadlo, tak i letiště mělo potřebné a schválené vybavení.

Na letišti v Praze je několik radionavigačních zařízení, která umožňují provoz za snížené viditelnosti. Pro lepší pochopení budou tato zařízení detailněji popsána.

Prvním, nejméně přesným, zařízením je NDB. Tento systém je ze všech zmíněných nejstarší. NDB může sloužit jak pro navigaci po trati, tak i pro přístrojové přiblížení, právě tak, jak tomu je na letišti v Praze. Aby mohl být NDB maják použit pro přiblížení, musí být umístěn před nebo za dráhu přímo do její osy. Maják NDB může být umístěn buď samostatně (LKPR), anebo jako dvojice (obrázek 2 – letiště Kunovice na Moravě). [3] Důvodem pro umístění dvou těchto zřízení za sebe je ten, že dojde k větší přesnosti při navigaci. Pilot má indikaci ze 2 zařízení a tím pádem, když má obě indikace mířící k majáku přes sebe, tak ví, že je správně v ose dráhy. Současně pak ve chvíli, kdy se dostane do polohy nad maják, a tedy do tzv. zone of confusion, je indikace od přelétávaného majáku nedůvěryhodná. I v tuto chvíli má však pilot dostupnou stále indikaci od druhého majáku. [5]



Obrázek 2 Přiblížení NDB se 2 majáky na letišti Kunovice (LKKU). [3]



Dalším radionavigačním zařízením, které se používá na letišti v Praze, je VOR. Toto zařízení je již přesnější než NDB, avšak stále poskytuje pouze laterální vedení. Pilot díky indikaci z VORu zná přesně svoji odchylku vůči nastavenému radiálu. Samotné zařízení na palubě funguje na principu, kdy je porovnáván referenční a proměnný 30 Hz signál vysílaný z majáku na zemi. Podle principu fungování existují dva typy majáku CVOR a DVOR. Na letišti v Praze je instalován DVOR, který funguje na novější technologii.

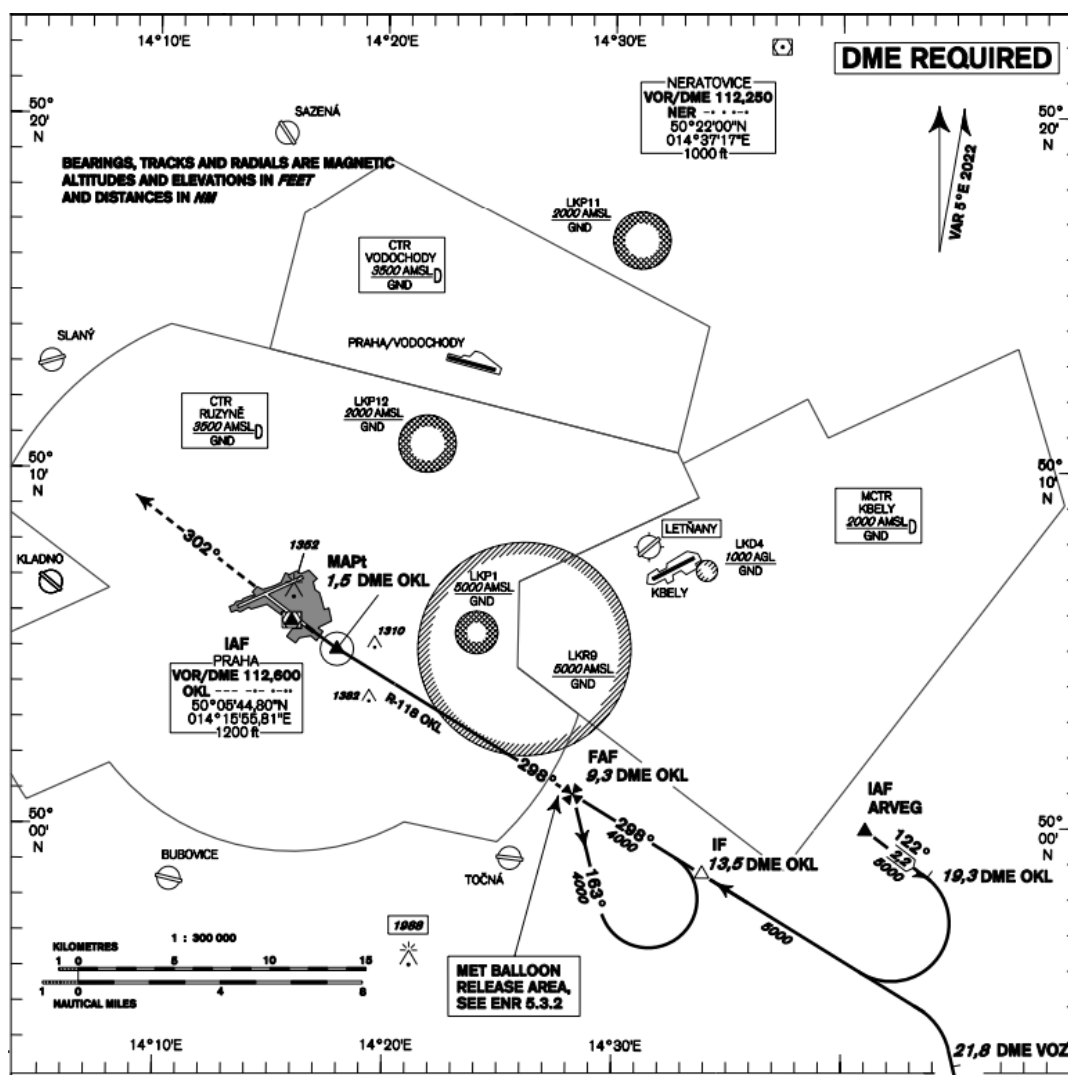
Na rozdíl od majáku NDB nemusí být VOR instalován v ose dráhy. Vzhledem k tomu, že na LKPR existuje pouze jeden maják NDB, publikované přiblížení s využitím tohoto radiomajáku je dostupné pouze pro dráhu 06/24 z obou směrů. Oproti tomu přiblížení s využitím letištního majáku VOR je publikováno pouze pro dráhu 12/30, protože poloha tohoto majáku neumožňuje jeho použití pro přístrojové přiblížení na hlavní dráhu 06/24. V Praze se tento maják nachází západně vedle dráhy 12/30 na úrovni mezi výjezdy P a R. Právě proto, že se nenachází v ose dráhy, vytváří pro letadla přistávající na dráze 12/30 tzv. offset. Pokud porovnáme hodnotu magnetického směru dráhy z tabulky 1 a kurzu konečného přiblížení z přiblížovací mapy, zjistíme, jak velký offset je pro dané přistání designovaný. Příklad je na obrázku 3, kdy magnetický směr dráhy je 302° , avšak kurz konečného přiblížení je 298° . Z toho plyne, že letadlo bude ve výšce rozhodnutí vybočeno o 4° (v podmínkách bezvětří). [3, 5]

Každé přístrojové přiblížení má určenou výšku rozhodnutí. Je to výška, ve které se pilot musí rozhodnout, zda bude pokračovat v přiblížení, anebo zahájí postup nezdařeného přiblížení v případě, kdy v této výšce nebude mít dostatečný vizuální kontakt. Podle typu přiblížení a přesnosti využívaného systému jsou přístrojová přiblížení rozřazena do dvou kategorií podle ICAO Annex 6 a zároveň podle předpisu L 6. [6]

Kategorie A zahrnuje přiblížení s vyšší výškou rozhodnutí. Konkrétně přiblížení s výškou rozhodnutí vyšší než nebo odpovídající 250 stopám nad zemí. Do této kategorie spadají všechna přiblížení založená na VOR, NDB, RNP (LNAV/VNAV).

Kategorie B pak zahrnuje přiblížení s výškou rozhodnutí nižší než 250 stop. V tomto případě se jedná o Přiblížení ILS (CAT I, II, III), RNP (LPV) a další.

Přiblížení mohou být rozdělena také podle ICAO Annex 10 na nepřesné přístrojové přiblížení, přiblížení s vertikálním vedením a přesné přístrojové přiblížení.



Obrázek 3 VOR přiblížení na dráhu 30 na LKPR. [3]

Dalším typem přiblížení na letišti v Praze je ILS přiblížení. V tomto případě se jedná o přiblížení, které zajišťuje vertikální vedení. Skládá se ze dvou antén LOC a GP. První anténa s označením LOC slouží pro laterální vedení letadla a GP pro vedení letadla ve vertikální rovině. Tento systém je velmi přesný a není ovlivněn změnami teplot. V současnosti se jedná o nepřesnější přiblížovací systém. V Praze je ILS dostupný pro obě dráhy v obou směrech. [5]

Tento přiblížovací systém může být certifikován na kategorie CAT I, II a III. Pokud je systém používán pro ILS CAT I, pak je výška rozhodnutí 200 stop. V případě, kdy je certifikován pro ILS CAT II nebo CAT III, je výška rozhodnutí méně než 200 stop. V současné době se jedná o jediný systém, který má výšku rozhodnutí pod 200 stop. Na pražském letišti je na vedlejší dráze 12/30 dostupný ILS CAT I. Na hlavní dráze ve směru přistání na dráhu 06 je dostupný také ILS CAT I a ve směru přistání na dráhu 24 je možné využít ILS CAT II a III.



Výhodou takto přesného systému je, že umožňuje přistání za horších meteorologických podmínek, zejména za snížené dohlednosti. Současně s tím však existují určité limitace. Aby mohl být používán ILS CAT II a III, tak musí být na letišti vyhlášen provoz za snížené dohlednosti neboli LVO. V tomto provozu musí letadla před vstupem na dráhu vyčkávat na vzdálenějších pozicích od drah tak, aby nedošlo k narušení citlivého prostoru antény GP, jelikož právě přesnost celého systému je klíčová k bezpečnému provozu. Zároveň také rozestup mezi přistávajícími letadly musí být větší, aby nedošlo k znehodnocení signálu. Všechny tyto limitace mají vliv na kapacitu letiště tak, že ji snižují.

Posledním typem přiblížení je RNP. Toto přiblížení nemá žádnou anténu na zemi a funguje díky satelitům GNSS. Existuje několik způsobů, jak toto přiblížení letět podle vybavenosti letadla. Nejpřesnější možností je LPV, kdy je využíván augmentační systém pro přesnější vedení letadla po trati. Další variantou je LNAV, což umožňuje pouze laterální vedení letadla, anebo LNAV/VNAV, kdy si letadlo dopočítává vertikální rovinu na základě hodnot z barovýškoměru. [5]

Další částí infrastruktury letiště jsou pojezdové dráhy. Ty jsou potřeba pro najetí nebo opuštění dráhy a dále pro pojíždění po letišti. Pro účely této práce budou zmíněny pouze pojezdové dráhy potřebné k vyjetí nebo naopak najetí letadla. V tabulce 3 je znázorněno, jaké pojezdové dráhy se používají pro vstup nebo opuštění dráhy [3].

Tabulka 3 TWY pro výjezd z RWY.

RWY	TWY
06/24	A, B, C, D, E, F, L
12/30	D, F, G, L, P, R

Pro urychlení vyjetí letadla z dráhy je využíváno takzvaných RET neboli pojezdových drah pro rychlé odbočení. Díky těmto pojezdovým dráhám je možné opustit RWY při vyšší rychlosti a dobrzdit až v průběhu vyjetí. Tyto pojezdové dráhy musí svírat s dráhou menší úhel ve srovnání s klasickými TWY. Na pražském letišti jsou to pojezdové dráhy D a L. [3, 4]

3. Faktory ovlivňující propustnost dráhového systému

V této kapitole budou popsány faktory ovlivňující propustnost dráhového systému, a tedy i kapacitu letiště. Tyto faktory je možné rozdělit do 4 základních skupin. Faktory provozu letiště, řízení letového provozu, počasí a letadla.

3.1. Faktory provozu letiště Praha (LKPR)

3.1.1. High Intensity Runway Operations

High Intensity Runway Operations jsou postupy definované v publikaci AIP [3]. Mají za cíl zvýšit kapacitu letiště a snížit dobu zpoždění odlétajících a přilétajících letadel. Tyto postupy jsou používány v době od 04:00 do 20:00 UTC. Tyto postupy definují, které pojezdové dráhy by měly být použity pro uvolnění dráhy pro dané letadlo podle skupiny letadel, do které patří. Tyto postupy nejsou povinné a měly by být dodrženy pouze v případě, kdy to situace bezpečně dovolí. Pro uvolnění dráhy jsou při HIRO definovány pojezdové dráhy pro uvolnění RWY podle tabulky 4. V tabulce je vždy předepsána TWY pro uvolnění a pod touto informací je publikována LDA pro daný výjezd. [3]

Tabulka 4 TWY pro uvolnění RWY při HIRO.

Kategorie letadla	TWY pro uvolnění RWY						
	LDA [m]						
	RWY 06		RWY 24		RWY 12		RWY 30
Medium Jet	L	B	D		P	R	G
	1558	2448	2075		1690	2535	2099
Medium Prop	L		C	D	P		G
	1558		1309	2075	1690		2099

Stejně jako pro uvolnění dráhy jsou publikované i doporučené pojezdové dráhy pro najetí na aktivní RWY podle tabulky 5. V této tabulce je namísto LDA publikována TORA. V případě, kdy je v políčku uvedeno THR, je tím myšleno využití celé délky dráhy vstupem na práh dráhy.

Při vstupu na dráhu za účelem vzletu by mělo dojít ke vzletu bez prodloužení po vstupu na dráhu. Výjimkou je, když je letadlu umožněn vstup na dráhu v momentě, kdy přistávající letadlo ještě stále neuvolnilo RWY. V takovém případě letadlu není vydáno povolení pro vzlet a musí vyčkat na dráze.

Tabulka 5 TWY pro vstup na RWY při HIRO.

Kategorie letadla	TWY vstup na RWY			
	TORA [m]			
	RWY 06	RWY 24	RWY 12	RWY 30
Medium Jet	E	THR	D	THR
	3077	3715	2757	3250
Medium Prop	D	G	B	R
	2266	2238	2557	2590

Dalším specifíkem je provoz v zimním období. Od poklesu teploty pod určitou hodnotu může docházet k tomu, že letadla vstupující na dráhu budou žádat čas pro tzv. static run up z důvodu odstranění námrazy na letadle. Pro provoz to znamená, že letadlo bude na dráze nějakou dobu čekat. Tato doba závisí na typu letadla, například u Boeingu B737NG to může být 30 vteřin.

3.1.2. Postupy pro omezení hluku při nočním provozu

Během nočního provozu jsou vzlety a přistání omezeny [3]. Jedná se o čas od 20:00 do 04:00 UTC. V tomto časovém období je provoz letadel s maximální vzletovou hmotností nad 45 tun zakázán. Existují zde ale určité výjimky. V tomto časovém rozmezí mohou použít letiště letadla nad 45 tun, pokud patří do některé z 9 hlukových kategorií, které stanovuje letiště Praha. Počet letadel během tohoto provozu je však regulován. Další možností je pak udělení výjimky letištěm pro letadla, která v tomto seznamu nejsou. Omezení na noční provoz se nevztahuje na lety, které deklarovaly nouzi, pokračují v letu po přerušení letu, využívají letiště z důvodu meteorologických podmínek nebo provádí lety pro účely státu a další výjimky specifikované v Letecké informační příručce. [3]

Během nočního provozu je současně zakázáno použití plného reverzního tahu. Výjimku tvoří pouze případy, kdy je použití reverzního tahu nutné z důvodu bezpečnosti.

3.1.3. Preferenční systém použití RWY na LKPR

Preferované použití drah na LKPR je stanoveno v tomto pořadí:

- 1) RWY 24
- 2) RWY 06
- 3) RWY 30
- 4) RWY 12



Podle výše definovaných preferencí je jasné, že přednost má v provozu hlavní dráha 06/24. Provoz na dráze 12/30 v době od 20:00 do 04:00 UTC není povolen. Zároveň taktéž není povolen provoz letadel s MTOW nad 7 tun na této dráze v době od 04:00 do 20:00 UTC. Na toto omezení se vztahuje výjimka v případě, že je hlavní dráha 06/24 [3]:

- a) mimo provoz
- b) zařízení ILS na této dráze není v provozu
- c) kontaminována a hodnocena nižší hodnotou RWYCC než je 5
- d) Existuje možnost stříhu větru nebo bouřky blízko letiště, co by mohlo ovlivnit letadlo během přistání nebo při vzletu
- e) nepoužitelná kvůli překročení limitů větru (boční vítr překračuje rychlost 15 uzlů nebo zadní vítr překračuje hodnotu 5 uzlů)
- f) existuje vysoká možnost střetu s ptáky nebo kolize s jinými zvířaty

Výjimka může být udělena v případě žádosti velitele letadla, pokud se jedná o:

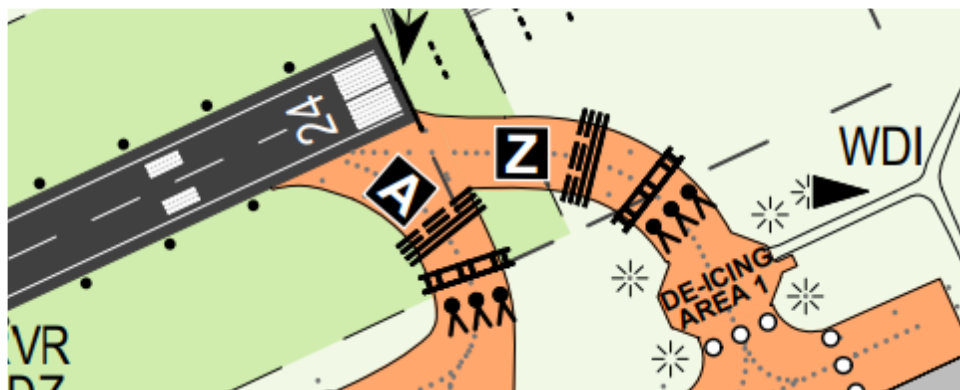
- a) nouzi
- b) záchranu života
- c) letadlo úřadu pro civilní letectví
- d) letadlo vykonávající ověřování funkčnosti přibližovacích procedur nebo navigačních zařízení
- e) V případě, kdy nastanou podmínky na hlavní dráze 06/24 a základna oblačnosti je nižší než 500 stop, dohlednost nižší než 1900 metrů. Nebo základna mraků je pod 800 stop a dohlednost pod 3000 metrů v případě, kdy je prováděno přiblížení s výškou rozhodnutí nad 300 stop.

3.1.4. Postupy za snížené dohlednosti

Pokud dráhová dohlednost (RVR) klesne pod 600 metrů alespoň v jedné třetině dráhy nebo je základna oblačnosti ve výšce 250 stop a níže, je vyhlášen provoz za snížené dohlednosti. Na LKPR je pro provoz za snížené dohlednosti vybavena pouze dráha 24. Z hlediska provozu je pro tento druh operací nutné mít schválené přibližovací zařízení, v tomto případě ILS, pro kategorii ILS CAT II/III. Tato problematika byla detailně rozebrána v předchozí kapitole. [3]

V takovém případě pak je nutné uvažovat větší rozestupy mezi přilétávajícími letadly z důvodu, aby nedošlo k rušení signálu ILS. Přilétající letadla v takovém případě budou do osy dráhy přiváděna minimálně 3 námořní míle před FAF. Při vzletu je nutné dodržet rozestup, kdy letadlo přeletí konec dráhy před tím, než je možné najetí dalšího letadla. V případě vyčkávajících letadel je pak nutné počítat s delším časem potřebným k najetí na dráhu z důvodu vyčkávání na vyčkávacím místě pro kategorii CAT II/III (Obrázek 4).

V případě LVO jsou definované TWY, které mohou letadla využít pro vzlet (TWY A, B, Z) a které musí využít k uvolnění dráhy po přistání (TWY C, D, E, F). Po opuštění dráhy letadla pokračují po pojezdových drahách podle pokynů ATC. Na určené stání, je letadlo při provozu za snížené dohlednosti, zavedeno z pojezdové dráhy na úrovni tohoto stání za asistence služby Follow me.



Obrázek 4 Znárodnění vyčkávacího místa při LVO. [3]

3.2. Faktory řízení letového provozu (ATC)

3.2.1. Rozestupy mezi letadly

Úkolem řízení letového provozu je zajistit dostatečnou separaci mezi letadly ve všech fázích letu. Rozestupy mezi letadly jsou zajišťovány v několika kategoriích podle požadavků dokumentu ICAO Doc 4444 nebo jeho českého znění předpisu L 4444. [7]

Rozestupy se zajišťují vertikálně a horizontálně. Řízení letového provozu musí obecně zajistit rozestupy mezi všemi lety ve vzdušném prostoru tříd A a B, mezi lety IFR v prostorech C, D a E, mezi lety VFR a IFR v prostorech C, mezi lety IFR a zvláštními lety VFR a mezi zvláštními lety VFR vzájemně, pokud je tak stanoveno. Pro účely této práce je důležité objasnit konkrétně zajišťování rozestupů ve vertikální a horizontální rovině. [7]

Vertikálně jsou rozestupy mezi letadly zajišťovány na základě výšky jednotlivých letadel. Minimální rozestup mezi letadly je 1 000 stop neboli 300 metrů do FL290 (letové hladiny 290). Nad hladinou 290 jsou pak dodržovány rozestupy 2 000 stop, což odpovídá 600 metrům. V určitých případech, kdy jsou v prostoru mezi FL290 a FL410 uplatněny snížená separační minima (RVSM prostor), jsou i v tomto prostoru zajišťovány separace 1 000 stop vertikálně. [7]

Kromě vertikální separace je mezi letadly zajišťována i horizontální separace.

Při odletu je separace mezi letadly standardně stanovena na 5 minut. V tomto případě se uvažuje, že není k dispozici vertikální separace a obě letadla plánují odlet po stejné trase. Tento rozestup může být za určitých podmínek snížen na 2 minuty. Nejnižší separace na



odletu je možné dosáhnout v případě, kdy se odletové tratě liší o více než 45 stupňů, a to až na 1 minutu.

Horizontální rozestupy jsou dále zajišťovány ve smíšeném provozu na jedné dráze. Smíšeným provozem na dráze se rozumí střídavý provoz odletů a přiletů na jednu dráhu. Rozestup mezi odlétávajícími a přilétávajícími letadly musí být minimálně 3 minuty mezi odletem a přiletem letadla nad přístrojovou dráhu v případě, kdy přilétávající letadlo provádí úplné přístrojové přiblížení, a 5 minut v případě, kdy přilétávající letadlo provádí přímý přilet. [7]

Dalším typem rozestupu je separace z důvodu turbulence v úplavu. Tento rozestup je nutné dodržovat, aby se nestalo, že v případě, kdy letí dvě letadla za sebou, se druhé v pořadí dostane do turbulence v úplavu za tím prvním.

Důležitým parametrem je, zda letiště disponuje radarem či nikoliv. V případě, kdy není vybaveno radarovým systémem, pak jsou separace mezi letadly zajišťovány na základě času. Pro odlety, kdy letadlo odlétá za letadly kategorie MEDIUM, HEAVY nebo SUPER, jsou stanoveny horizontální separace. V případě, kdy přistává letadlo HEAVY za letadlem SUPER nebo MEDIUM za HEAVY, tak je separace stanovena na 2 minuty. Další skupinu tvoří provoz, kdy letadlo kategorie MEDIUM přistává za kategorií SUPER nebo LIGHT za HEAVY, při němž je separace zvýšena na 3 minuty. Poslední variantou je provoz, kdy přistává letadlo kategorie LIGHT za letadlem SUPER se separací 4 minut. [7]

Pro odlety je stanovena separace kvůli turbulenci v úplavu na 2 minuty. Pouze v případě, kdy odlétá letadlo kategorie LIGHT nebo MEDIUM za letadlem kategorie SUPER, je separace zvýšena na 3 minuty.

Minima rozestupů mohou být definována podle vzdálenosti v námořních mílích, a to v případě kdy jsou založena na přehledových systémech ATS. Přehledovými systémy ATS se rozumí použití primárního nebo sekundárního radaru na základě sledovací technologie ADS-B, systému MLAT, popřípadě kombinací těchto systémů.

Minimum rozestupů je stanoveno na 5 námořních mil. Toto minimum může být sníženo na 3 námořní míle, pokud to dovoluje radarové vybavení letiště. Naprostým minimem je snížení separace na 2,5 námořní míle pro letadla usazená na stejné trati konečného přiblížení do 10 námořních mil od prahu dráhy. Pro snížení rozestupu na 2,5 NM musí být splněny podmínky stanovené předpisem L 4444, mezi které patří například podmínka, kdy průměrný čas obsazení dráhy nepřesahuje 50 sekund při analýze prováděné na základě teoretického modelování nebo statistikou provozu. Další podmínkou je, že brzdný účinek musí být hlášen jako dobrý, aby čas obsazení dráhy nebyl nepříznivě ovlivněn možným kontaminantem. [7]



Pokud je letiště vybaveno přehledovými systémy ATS, musí být zajišťovány rozestupy z důvodu turbulence v úplavu na základě vzdálenosti v námořních mílích podle tabulky 6. [7]

Tabulka 6 Separace mezi letadly z důvodu turbulence v úplavu.

Předcházející	Následující	Separace [NM]
SUPER	HEAVY	5
	MEDIUM	7
	LIGHT	8
HEAVY	HEAVY	4
	MEDIUM	5
	LIGHT	6
MEDIUM	LIGHT	5

Letiště Praha disponuje systémy ATS, a proto jsou separace zajišťovány na základě vzdálenosti v námořních mílích.

Za předpokladu dodržení všech zmíněných separací může dojít za účelem zvýšení kapacity letiště a propustnosti dráhového systému k udělení povolení vstupu na dráhu. V případě, kdy bychom řešili rozestup mezi přilétajícím a odlétajícím letadlem, může odlétávající letadlo vstoupit na dráhu v momentě, kdy letadlo, které přistává, je v bezpečné vzdálenosti od místa najetí letadla. Povolení ke vzletu může být vydáno v momentě, kdy letadlo opustilo dráhu, a tedy ve chvíli, kdy každá část přistávajícího letadla nezasahuje do prostoru dráhy. Pokud dojde k udělení pouze vstupu na dráhu, musí být tento pokyn jasně a zřetelně zdůrazněn tak, aby nedošlo k záměně s povolením ke vzletu.

3.2.2. Rychlostní restrikce

Maximální povolená indikovaná rychlost pod letovou hladinu 100 (výška 10 000 stop při standardním tlaku 1013,25 hPa) je 250 uzlů.

Pro přilet jsou typicky aplikovány tyto rychlostní restrikce:

- 220 uzlů v poloze po větru
- Rozmezí 200 až 180 uzlů pro zachycení osy dráhy
- Rozmezí 180 až 160 uzlů po stabilizaci v ose dráhy
- 160 uzlů do 4. námořní míle od prahu dráhy

Všechny stanovené rychlostní restrikce by měly být dodržovány s přesností +/- 5 uzlů.



3.3. Faktor počasí

3.3.1. Počasí ovlivňující let

Počasí je faktorem, který v případě simulace provozu v oblasti dráhového systému definuje důležité parametry, jako je dráha v používání a přístrojové přiblížení v používání. V případě přistání na dráhu je limitujícím faktorem vítr. Pro pohyb letadla za účelem vzletu a přistání jsou jasně definované limity, které nesmí být překročeny. Liší se podle typu letadla, druhu operace a dalších faktorů. Obecně řečeno je potřeba, aby vítr, který je aktuálně na letišti naměřen, byl v protisměru přistávajících a odlétávajících letadel.

Limity větru existují nejen pro provoz samotných letadel, ale své limity má stanoveno i letiště. Důvodů pro jejich stanovení může být více. Například se může jednat o možnost přenosu provozu na výhodnější dráhu z hlediska hluku. Limity větru jsou podle publikace AIP pro Českou republiku stanoveny pro LKPR na [3]:

- Maximální komponent bočního větru je 15 uzlů (28 km/h)
- Maximální komponent zadního větru je 5 uzlů (9 km/h)

Zdrojem pro informace o počasí na daném letišti jsou zprávy METAR A TAF. METAR v překladu znamená Meteorologická letištní zpráva, a tedy aktuální počasí pro dané letiště. Konkrétně v případě Prahy se tato zpráva vydává dvakrát za hodinu, vždy v celou a půl hodinu. Meteorologické údaje pro tuto zprávu jsou získávány z letištních stanic. V případě, kdy dojde k rapidní změně počasí, je vydána zpráva SPECI neboli speciální meteorologická letištní zpráva.

Druhou zmíněnou zprávou byl TAF, což je letištní předpověď na určité časové období. Tato předpověď je vydávána čtyřikrát za den a je platná na 24 nebo 30 hodin v závislosti na daném letišti. Předpověď TAF je platná nejen pro letiště, ale zároveň i pro jeho okolí. METAR i TAF používají stejné zkratky pro popis počasí.

Příklad zprávy METAR A TAF pro LKPR ze 6.11.2023:

METAR LKPR 052300Z 24022KT 9999 FEW045 09/05 Q0996 NOSIG=

*TAF LKPR 052300Z 0600/0706 22014KT 9999 SCT040 TEMPO 0600/0621 23016G26KT
8000 -SHRA SCT025 PROB40 TEMPO 0600/0612 24020G36KT PROB30 TEMPO
0622/0706 22014G24KT 8000 -SHRA SCT025=*

Dalším limitujícím faktorem je pak výška základny oblačnosti, což může mít vliv na volbu přístrojového přiblížení.

V Praze jsou standardně dostupné přibližovací systémy ILS, blíže popsány v kapitole 2. Tyto systémy patří do kategorie B, tedy přiblížení s výškou rozhodnutí pod 250 stop. V případě, kdy



tento systém není k dispozici, tak může dojít k potřebě posádky letadla využít jiný typ přiblížení. Pokud by došlo k nutnosti použít přiblížení s vyšší výškou rozhodnutí, pak může i dojít k tomu, že na stejnou dráhu stejné letadlo nebude schopné přistát, jelikož ve výšce rozhodnutí nebude mít pilot vizuální kontakt se zemí.

Tento faktor musí být brán v úvahu zejména tehdy, když je primární přibližovací systém mimo provoz a musí být použit jiný.

Důležitá je také hodnota dohlednosti, popřípadě dráhové dohlednosti, na jejím základě je vyhlašováno LVO.

3.3.2. Počasí ovlivňující pohyb po dráze

V tomto případě je nutné uvažovat zejména stavu dráhy, který je hodnocen pomocí čísla RWYCC neboli Runway Condition Code. Tato hodnota má vliv na brzdné účinky letadla a v krajním případě, kdy je kontaminace dráhy neakceptovatelná, může být tato dráha nepoužitelná pro vzlety a přistání. Přehled všech kódů a současně vlastnostech dráhy je v tabulce 7.

Při kontaminaci dráhy může docházet k prodloužení brzdné dráhy letadla. Při kontaminaci dráhy vodou se rozlišuje znečištění na kategorie damp (vlhká), wet (mokrá) a floded (zatopená). V případě posledních dvou možností může docházet k aquaplanningu, což má za následek prodloužení brzdné dráhy.

Aquaplanning může vznikat dynamický. Při tomto druhu není pneumatika schopná pojmout množství vody a začne docházet k hromadění vody před pneumatikou. Dalším typem je viskózní aquaplanning, kdy je vrstva vody natolik tenká, že pneumatika při dosednutí nepronikne touto vrstvou a začne klouzat na jejím povrchu. K poslednímu typu aquaplanningu může dojít v momentě, kdy při přistání dojde k zablokování kola a na dráze je vrstva vody. V tu chvíli se vzniklým teplem při tření začne voda pod pneumatikou odpařovat. [8]

Dalším kontaminantem může být sníh, v důsledku čehož je vydáván SNOWTAM, který obsahuje informaci o brzdných účincích. V tabulce 7 je evidentní, že existuje několik druhů sněhu a v závislosti na druhu sněhu na dráze se určuje její RWYCC. Rozlišuje se mokrý a suchý sníh a dále pak stlačený nebo se dá také označit jako udusaný. [4, 9]

V tabulce 7 jsou zároveň také uvedeny možnosti kombinací jednotlivých kontaminantů pro případ, kdy se na dráze objevují ve více vrstvách nad sebou.

Tabulka 7 Tabulka pro RWYCC.

RWYCC	Runway Condition	Braking Action	METAR Braking Condition
6	DRY	-	-
5	WET	GOOD	95
	FROST		
	WET or DRY SNOW (3 mm or less)		
	SLUSH (3 mm or less)		
4	COLDER THAN -15 °C (COMPACTED SNOW)	GOOD to MEDIUM	94
3	WARMER THAN -15 °C (COMPACTED SNOW)	MEDIUM	93
	WET or DRY SNOW (more than 3 mm)		
	ANY SNOW over COMPACTED SNOW		
2	WATER SLUSH (more than 3 mm)	MEDIUM to POOR	92
1	ICE	POOR	91
0	WET ICE	NIL	NIL
	SLUSH over ICE		
	ANY SNOW over ICE		
	WATER over COMPACTED SNOW		



3.4. Faktory ovlivňující propustnost z pohledu letadla

3.4.1. Kategorie letadla

Letadla je možné rozřadit do několika kategorií podle různých kritérií. Nejčastěji se letadla rozdělují do kategorií A až E podle rychlosti nad prahem dráhy, což je zpracováno v tabulce 8. Toto rozdělení letadel je definováno agenturou ICAO. V praxi toto rozdělení slouží k určení požadavků a limitů pro přístrojová přiblížení v závislosti na konkrétním typu letadla. [10]

Tabulka rozdělení letadel podle rychlosti nad prahem dráhy v_{at} slouží současně ke stanovování rychlostí, popřípadě rozmezí rychlostí v jednotlivých fázích letu pro každou kategorii letadla. Rychlost v_{at} je stanovena jako $1,3 \times v_{s0}$ nebo také jako $1,23 \times v_{s1g}$, kde v_{s0} odpovídá pádové rychlosti letadla v čisté konfiguraci a v_{s1g} odpovídá pádové rychlosti letadla v přistávací konfiguraci. Fáze letu, pro které jsou limity rychlostí stanoveny, jsou fáze počátečního přiblížení, konečného přiblížení a maximální rychlosti pro střední a konečnou fázi nezdařeného přiblížení a přiblížení okruhem.

Tabulka 8 Kategorie letadel podle rychlosti nad prahem dráhy.

Aircraft Category	Speed at threshold $v_{(at)}$ [KT]		Initial Approach [KT]		Final Approach [KT]		MAX speed for circling [KT]	MAX speed for intermediate missed approach [KT]	MAX speed for final missed approach [KT]
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX			
A		<91	90	150	70	110	100	100	110
B	91	120	120	180	85	130	135	130	150
C	121	140	160	240	115	160	180	160	240
D	141	165	185	250	130	185	205	185	265
E	166	210	185	250	155	230	240	230	275

Dalším možným rozdělením letadel podle agentury ICAO je do skupin A až F podle rozpětí křídel. Toto rozdělení je znázorněno v tabulce 9.

Tabulka 9 Kategorie letadel podle rozpětí křídel.

Aircraft Category	Wingspan [m]	
	MIN	MAX
A		<15
B	15	<24
C	24	<36
D	36	<52
E	52	<65
F	65	<80

Rozdělení letadel podle rozpětí křídel je definováno z důvodu zjednodušení určení způsobilosti letadel, která dané letiště mohou použít či nikoliv. Každé letadlo je tedy klasifikováno písmenem podle tabulky 9 a současně také číselným označením 1 až 4 podle potřebné referenční délky dráhy.

V kapitole 3 byla rozebrána problematika určování rozestupů podle turbulence v úplavu. V souvislosti s tímto tématem je potřeba zmínit rozdělení letadel podle turbulence v úplavu. Toto rozdělení vzniklo proto, aby měla letadla mezi sebou dostatečný rozestup a nestalo se tak, že následující letadlo vletí do turbulence za předcházejícím letadlem.

Turbulence v úplavu je tvořena turbulentními víry, které vznikají na konci křídel za letadlem ve vzduchu. Jelikož tyto víry rotují, tak jsou nebezpečné pro další letadla, která by do nich vlétla. Největším rizikem je tento jev pro malá letadla, která letí za větším letadlem. V takovém případě je separace největší z toho důvodu, aby nedošlo ke scénáři, kdy by malé letadlo vlétlo do víru s průměrem podobným rozpětí křídel tohoto malého letadla. Separace jsou však udržovány i mezi stejně velkými letadly, avšak tyto separace jsou menší. V tabulce 10 jsou definovány kategorie letadel podle turbulence v úplavu.

Tabulka 10 Kategorie letadel podle rozpětí křídel.

Aircraft Category	MTOW [kg]	
	MIN	MAX
LIGHT (L)		< 7000
MEDIUM (M)	7 000	136 000
HEAVY (H)	> 136 000	
SUPER (J)	N/A	N/A

Speciálním případem je kategorie SUPER, kam v současné době patří pouze typ letounu Airbus A380-800, jelikož u tohoto letounu je nutné dodržovat větší separace i v případě letounů kategorie HEAVY. V minulosti do kategorie SUPER patřil ještě Antonov AN-225.

3.4.2. Hmotnost letadla

Hmotnost letadla ovlivňuje jak vzlet, tak i přistání. Z pohledu letadla existují hmotnostní omezení strukturální a výkonnostní. U dopravních letadel musí být zabezpečeno, že aktuální váha bude v limitech, tak aby mohl být let operován.

Na každém letu se sledují 3 hmotnostní limitace. Prvním je váha letadla bez paliva, v originálním anglickém názvu se jedná o zero fuel weight. Díky tomuto limitu posádka nebo provozovatel ví, kolik může na daném letu akceptovat cestujících a nákladu. Dalším limitem je pak maximální vzletová hmotnost. Ta může být limitována maximálním strukturálním nebo výkonnostním zatížením. To v praxi znamená, že pokud existují podmínky, kdy letadlo nemá dostatečný výkon, například pokud je na daném letišti krátká dráha nebo je vysoká teplota, pak bude více limitující výkonnostní maximální povolená hmotnost, která je pro každý let jiná. V případě, kdy jsou všechny parametry dostačující, bude letadlo limitováno strukturální maximální vahou, a tedy limit váhy bude dán tím, co konstrukce letadla dovolí. Strukturální maximální hmotnost je konstantní.

Posledním limitem je maximální váha pro přistání. Stejně jako maximální vzletová hmotnost je i v tomto případně limitace stanovená jak strukturálně, tak i výkonnostně. Se zvyšující se vahou se bude zpravidla potřebná dráha pro vzlet nebo přistání prodlužovat. Existují však metody, kterými lze tuto potřebnou vzdálenost ovlivnit.



3.4.3. Faktory ovlivňující délku dráhy pro vzlet

Faktorů, které ovlivňují vzlet, je několik a jsou stanoveny v závislosti na vstupních údajích. Mezi tyto vstupní údaje patří, na jakém letišti bude vzlet proveden, jaká konkrétní dráha bude pro vzlet použita, jakou pojezdovou dráhu posádka zvolí pro vstup na dráhu, aktuální vítr, teplota a tlak na letišti. Dále jsou pak mezi vstupní podmínky zařazeny i informace o kontaminaci dané dráhy.

Klíčovým faktorem je konfigurace letadla. Konfigurací letadla se rozumí zejména volba vzletových klapek. Ty jsou pro vzlet vypočítány na základě výše zmíněných vstupních údajů. Čím větší klapky jsou na vzlet použity, tím kratší je potřebná dráha pro vzlet, současně však klesá rychlost stoupání, které je letadlo schopno po vzletu dosáhnout. Proto volbu klapek neovlivňují pouze výše zmíněné parametry, ale i limitace dané okolním prostředím, jako například výška překážek v okolí letiště, případně na trase vzletu.

Dalším faktorem je výkon motorů letadla. Na dopravních letadlech existují zpravidla dvě možnosti, jak výkon motorů při vzletu ovlivnit. První variantou je snížení tahu motorů. V případě, kdy na letišti existují podmínky, umožňující tento krok, může software určující konfiguraci letadla snížit tah motorů. Vhodnými podmínkami jsou dlouhá dráha, nízká teplota a protivítr. Následně je tato informace zadána do palubního počítače v letadle. Výsledkem je prodloužení délky rozjezdu ve srovnání s plným výkonem za cenu nižšího opotřebení motoru. Z důvodu délky hlavní dráhy na letišti v Praze je tato metoda běžnou praxí pro letadla malé a střední kategorie.

Druhou variantou je pak použití metod snížení tahu motorů na základě zadání vyšší teploty než reálné do palubního počítače letadla. Letadlo pak použije pro vzlet nižší tah, což opět snižuje opotřebení motoru, případně snižuje možnost pro vysazení motoru při rozjezdu. Použití této metody, ve srovnání s první variantou, je možné při vzletu zrušit a okamžitě využít plný tah motorů.

Další možností je metoda zvýšeného gradientu stoupání. Tato metoda naopak potřebnou délkou pro rozjezd letadla zvyšuje. Je to z toho důvodu, že software pro výpočet výkonů na vzlet po zadání této metody vypočítá vyšší rychlost rotace letadla. Díky tomu bude mít letadlo při odpoutání vyšší rychlost a tím pádem bude gradient stoupání také větší.

V neposlední řadě je délka rozjezdu ovlivňována použitím klimatizace a omrazování během rozjezdu, jelikož obě tyto varianty odebírají vzduch z motoru, a tedy snižují jeho výkon. Klimatizace se pro vzlet standardně nevypíná. Může však dojít k tomu, kdy výkon motorů není dostatečný, pokud je klimatizace zapnutá. Takovými podmínkami je vysoká teplota okolního vzduchu na daném letišti většinou v kombinaci s krátkou dráhou. Odmrazování motoru je pak používáno v případě, kdy na letišti panují námrazové podmínky. Vzhledem k tomu, že



odmrazování náběžných hran křídla a vstupů do motoru je záležitost provozu v zimě, kdy je nízká okolní teplota, tak zpravidla odmrazování není limitující pro výkon tahu motorů při vzletu.

3.4.4. Faktory ovlivňující délku dráhy pro přistání

Jedním z hlavních faktorů, tak jako při vzletu, je nastavení klapek. Na dopravních letadlech existuje více možností nastavení klapek pro přistání. Pokud pilot zvolí vyšší nastavení klapek, pak je nižší přiblížovací rychlost a zároveň se tím snižuje i potřebná dráha pro zastavení. Nicméně pokud existují okolní podmínky, kdy je vhodnější použít nižší nastavení klapek, pilot ho zpravidla zvolí i za předpokladu zvýšení potřebné dráhy pro přistání. Mezi tyto podmínky se řadí například silný vítr, termická turbulence nebo vysoké překážky v sektoru nezdařeného přiblížení.

Dalším faktorem je brzdění po dosednutí. Pilot může po dosednutí brzdit manuálně nebo využít možnosti automatických brzd. V případě, kdy to podmínky dovolí, je volen nejnižší bezpečný stupeň brzdění tak, aby docházelo co nejméně k zahřátí brzd, čím se brzdy méně opotřebují a dojde tak i ke snížení rizika přehřátí brzd.

Dále je k dispozici možnost použití zpětného (reverzního) tahu motorů. Tato metoda redukuje primárně zahřívání brzd, ale i snižuje dráhu potřebnou k brzdění. Použití zpětného tahu však může být, a v Evropě zpravidla bývá, omezeno provozovateli letišť tak, aby byla snížena hluková zátěž v okolí letišť. Toto omezení platí i v případě letiště Praha, jak bylo uvedeno v kapitole 3.1.2.

Bod dosednutí, nebo také záměrný bod, je specifikovaný bod na dráze. Je umístěn v rámci dotykového pásma na dráze. Jedná se o bod, kde by se letadlo mělo dotknout koly hlavního podvozku. V závislosti na přesnosti přistání se prodlužuje nebo zkracuje potřebná dráha pro přistání.

Čas, které letadlo stráví na dráze, závisí i na volbě pojezdové dráhy pro uvolnění dráhy. Například v případě Letiště Václava Havla Praha, při používání dráhy 24, dojde ke zřetelné redukci doby potřebné pro uvolnění v případě, kdy letadlo uvolní dráhu přes pojezdovou dráhu C namísto D. Tento model však nelze aplikovat pro všechna letadla. Jedná se tedy zejména o malá turbovrtulová letadla, případně o letadla střední kategorie v závislosti na přistávací hmotnosti.



4. Literární rešerše

V případě strategického plánování, ať už letištní infrastruktury nebo i v případě jiného odvětví, je v dnešní době běžným nástrojem simulace. Za pomoci simulace je možné modelovat provoz, kapacitu a jiné parametry. Pro provedení simulace je zapotřebí simulační model či platforma. Následně po zadání požadovaných vstupů lze získat požadované výstupy, které mohou být přínosem pro predikci stavu určitého systému.

Strategickým plánováním na velkém časovém horizontu se zabývala univerzita v čínském Nanjingu. Důvodem pro tuto studii byla zvyšující se poptávka po volných kapacitách v letectví. Pro simulaci si vybrali letiště v Šanghaji. Prvním krokem v této studii bylo definování všech procesů, které probíhají na letišti při pohybu letadla. Pro samotnou simulaci byly definovány 3 submodely. Byly jimi model pro určení dráhové kapacity, model kapacity pojezdových drah a model kapacity apronu a stání letadel. [11]

V této studii byl pro simulaci použit software ProModel, který je pro takovéto letištní simulace často používán. Cílem simulace bylo vyhodnocení propustnosti tří výše zmíněných celků daného letiště za pomoci několika simulačních scénářů. Vstupními daty pro simulaci v tomto případě byly letový řád, provozní podmínky a možnosti kontroly modelu. Důležitými předpoklady pro zahájení simulace bylo modelování všech letů podle letového řádu, což bylo označeno za nejhorší provozní scénář. Každý jednotlivý let byl přiřazen určité skupině odbavovacích stánek, a tedy nebylo možné využít kteroukoliv libovolné stání. Do času obsazenosti stání bylo započítáno čekání na daném stání, nakládání a vykládání letadla a vytlačení letadla. Posledním předpokladem pak byla klasifikace dráhy jako jednoho systému, což v simulaci znamenalo, že v jeden okamžik mohl být dráhový systém využíván pouze jedním letadlem.

Pro validaci modelu byla využita funkce simulačního softwaru pro odhalení chyb v nastavení simulace a porovnání času, kdy letadlo využívalo dráhu v simulaci oproti letištním datům. Simulační scénáře byly definovány tři. Prvním byl běžný provoz podle provozních dat letiště a další dva scénáře byly simulovány za zvýšeného provozu.

Každý simulační scénář byl simulován pětkrát pro každý provozní den. Z výsledků simulace prvního scénáře bylo patrné rozložení provozu na daném letišti včetně zřejmého rozložení špiček provozu. Průměrná doba čekání na volnou dráhu v prvním scénáři přesahovala 3 minuty. V dalších dvou scénářích bylo z výsledků simulací patrné navýšení zpoždění provozu v důsledku navýšení počtu letů. V nejvíce exponovaném provozním scénáři se doba čekání na uvolnění dráhy navýšila několikrát.



Závěrem tedy simulace ukázala, že celková kapacita letiště je ovlivňována jeho jednotlivými subsystemy. Tato konkrétní studie, která simulovala provoz na letišti v Šanghaji, ukázala, že nejkritičtější částí letiště je dráhový systém, který má ze všech zmíněných subsystemů nejnižší propustnost. Dalším významným výsledkem bylo, že vliv na kapacitu letiště má i složení jednotlivých letů, a tedy typů letadel.

Simulace provozu na letišti však nemusí být vztažena pouze na provoz letadel v rámci infrastruktury letiště tak, jako to bylo v případě první zmíněné studie. Provoz na letišti lze simulovat například i v jeho neveřejné části. Může se jednat o provoz automobilové dopravy a určení kapacity parkovacích míst, vliv kolejové dopravy na kapacitu určité části letiště a dalších.

Studie námořní akademie ve francouzském Brestu se zabývala simulací pohybu lidí v rámci letištního terminálu. V tomto případě byl pro simulaci použit software Atlas založený na programovacím jazyku Java, který se skládá z komunikačního a migračního modulu. Tato studie se zabývala spíše popisem tohoto simulačního softwaru. Pro demonstraci simulačního prostředí byl vytvořen model pohybu cestujících mezi jednotlivými částmi terminálu 2 na letišti Charlese de Gaulla v Paříži. Cílem simulace bylo znázornit pohyb lidí mezi jednotlivými stanovišti s co největší přesností. Stanoviště A, B, C a D odpovídaly jednotlivým halám na terminálu 2, mezi kterými se lidé dopravovali za pomoci autobusu. [12]

Základními prvky simulace byli stanoveni lidé, jakožto cestující nebo návštěvníci, haly a jejich propojení, zastávky autobusu mezi jednotlivými halami, přílety a odlety. Vstupním parametrem do simulace byly letové řády, podle kterých se generovali lidé v modelu. Pohyby lidí byly definovány mezi halami za pomoci letištního autobusu z okolí do haly, z letu do haly a opačně. Na základě letových řádů docházelo ke generování pouze cestujících, návštěvníci byli generováni náhodně. V momentě, kdy vypršel jejich čas pro návštěvu, tak zmizeli z modelu. Chování lidí v terminálu bylo v modelu definováno jako čekání na let, čekání na autobus a čekání v hale. Dalším parametrem, který bude ovlivňovat pohyb lidí, bude procento cestujících, kteří nestihnou svůj let a tato hodnota byla stanovena na 0,5 až 2 procenta.

Simulace byla provedena v rámci tří scénářů. Stanovený počet odletů a příletů byl v prvním případě 18 odletů na halu. V druhém případě byl v jedné hale stanoven počet odletů na 5 a pro zbývající terminály 22. A v posledním scénáři byl simulován daný provoz s pouze třemi halami k dispozici, kdy každá hala musela odbavit 24 odletů za hodinu.

Z výsledků plyne, že v prvním případě byly lety odbavovány bez větších obtíží. V druhém případě byl zaznamenán nárůst lidí, kteří nestihli svůj let v důsledku snížené kapacity jedné haly terminálu. V posledním případě se zvýšeným počtem odletů je z výsledků evidentní vyšší zatížení autobusů mezi terminály, což má za následek zhoršení přestupů mezi lety.



V diskusi byly rozebrány zejména vlastnosti simulačního prostředí Atlas. Dále bylo také poukázáno na výhodu možnosti práce s časem v rámci simulace.

Podobnou problematikou se zabýval výzkum katalánské Polytechnické univerzity. Na rozdíl od předchozího výzkumu, který se zabýval pohybem cestujících mezi terminály, se španělský výzkum zaměřil na detailní popis pohybu cestujících uvnitř terminálu. Jedná se konkrétně o Terminál 1 na letišti Barcelona El-Prat, který byl dostaven v roce 2009. Pro tento výzkum byl vybrán programovací jazyk SDL a simulační prostředí Flight Planner Manager. Jedná se o techniku založenou na simulaci za pomoci agentů. Zároveň pro tento výzkum byla použita vizuální simulace. [13]

Struktura simulace byla vytvořena pomocí bloků, jednotlivých systémů a procesů a chování subjektů v simulaci bylo definováno jednotlivými procesy. Pro znázornění struktury modelu a chování modelu autoři použili bloková schémata.

Pokud je cílem studie zkoumat blíže pohyb cestujících v terminálu, je potřeba je detailněji rozdělit, a ne pouze na cestující a návštěvníky jako to bylo v předešlé studii. Z toho důvodu autoři tohoto výzkumu rozdělili cestující na 4 skupiny. První skupinou jsou mezinárodní cestující, což v tomto prostředí znamená cestující přilétávající na letiště ze zemí mimo Evropskou unii. Druhou skupinou jsou cestující na regionální úrovni, tedy ti, co cestují v rámci Schengenského prostoru, a tudíž nepotřebují na svém letu disponovat cestovním pasem. Třetí skupinou jsou regionální cestující, kteří však přiletěli nebo odlétají do země mimo Schengenský prostor. Poslední skupinou jsou lidé využívající takzvaný shuttle service, čímž se rozumí let mezi dvěma městy s pravidelným a častým spojením.

Dalšími účastníky simulace pak jsou další osoby pohybující se na letišti, což může být například doprovod cestujících, zaměstnanci a další. Samotní pasažéři jsou pak děleni do skupin podle jejich účelu na letišti. Tedy rozdělení na přilétající, odlétající a přestupující cestující. Pro cestující, kteří využívají letiště pouze pro přestup, bylo definované minimální časové okno, které garantuje, že daný cestující stihne návazný spoj.

Samotné letiště bylo pro účely simulace rozděleno na čtyři části. Vstupní prostor, terminál, odbavovací prostory letadel a satelitní terminál. Dále byly definovány tři úrovně simulace. Základní úroveň, kdy je počet lidí využívajících terminál úměrný aktivaci minima letištních zařízení. Nasycený, kdy provoz v terminálu dosahuje maximální kapacity, a střední, kdy úroveň provozu dosahuje úrovně mezi zmíněnými extrémy.

Výsledná data, která lze získat z této simulační platformy, jsou velmi rozsáhlá a záleží na dostupnosti vstupních dat do modelu. Díky tomuto výzkumu, oproti předchozím simulacím, které se zaměřovaly pouze na jednotlivé části terminálu, byl v rámci simulace popsán



podrobný pohyb subjektů v rámci celého nového terminálu. Samotný výzkum pak byl označen jako přínosný nejen ve fázi výstavby terminálu, ale i následně během jeho provozu.

Součástí náplně této diplomové práce je modelování provozu v oblasti dráhového systému na letišti v Praze. Stejnou problematikou se zabývali vědci z Nanyang Technological University v Singapuru. Konkrétně se zabývali simulací provozu v oblasti dráhového systému na letišti Changi v Singapuru. [14]

Se zvyšujícím se letovým provozem v této oblasti, a hlavně s růstem počtu letů nízkonákladových aerolinek v Asijsko-Pacifickém regionu, existoval důvod pro identifikaci dopadů zvýšeného provozu na fungování letiště, a tedy určení kapacity letiště. Letiště v Singapuru v době provádění výzkumu disponovalo dvěma dráhami, kdy jedna byla primárně určena pro přílety a druhá pro odlety. Již v době provádění experimentu existovaly plány o dostavbě třetí dráhy, která však dlouhou dobu ještě neměla být v provozu. Avšak nárůst v objemu letů byl nezastavitelný.

Pro simulaci provozu v oblasti dráhového systému na letišti v Singapuru byla použita platforma AirTOp, která umožňuje simulaci ve zrychleném čase pro provoz na letových trasách pro přílety a odlety. Data pro simulaci provozu byla získána za týdenní časové období z roku 2015. V simulačním prostředí byly vymodelovány pojezdové dráhy, dráhy pro vzlety a přistání, terminál a stání letadel tak, aby model reflektoval provoz na letišti s co nejvyšší přesností pro účely simulace.

Vstupními parametry byla letištní data. Ta obsahovala čas strávený na dráze, letové řády, separace letadel a další. Na základě vytvořeného simulačního modelu letiště a vstupních dat byly vytvořeny simulační scénáře.

První sada scénářů byla definována na základě aktuálního provozu pro rok 2015, kdy je provoz na dráhovém systému paralelní. První dílčí scénář byl simulován jako segregovaný provoz, což znamená, že jedna dráha se používá pouze pro odlety a druhá pouze pro přílety. Druhý dílčí scénář byl vytvořen jako smíšený.

Druhá sada scénářů byla vytvořena jako predikce roku 2020 a obsahovala 6 dílčích scénářů. Jednalo se o paralelní provoz segregovaný, smíšený a částečně smíšený, kdy jedna dráha je používána výhradně pro přílety a druhá pro přílety i odlety. V druhé polovině dílčích scénářů byl uvažován nezávislý provoz na drahách. Jednalo se o smíšený nezávislý provoz, částečně smíšený a v posledním scénáři byla jedna ze dvou drah používána pouze pro přílety středně velkých letadel.

Na základě výsledků simulace bylo patrné, že kapacita dráhového systému pro provoz na letišti v roce 2015 je dostatečná. Problémy s kapacitou nastaly v roce 2020, kdy první tři dílčí



scénáře nedokázaly odbavit simulovaný počet letů, a tedy letiště se dostalo na hranici kapacity dráhového systému. Důvodem byl paralelní provoz na souběžných drahách. Samotným indikátorem, že letiště nedokáže zvládat zadaný provoz byl, nárůst zpoždění letadel. Řešení přinesly zbylé tři scénáře, kde byl provoz simulován jako nezávislý. V těchto případech letiště již dokázalo odbavit všechny simulované lety.

Na závěr ze studie tedy vyplynulo, že v aktuálním roce 2015 je kapacita dostatečná. Pro navýšený provoz v roce 2020 však bude nutné upravit druh provozu v oblasti dráhového systému, a to z paralelního na nezávislý, kdy tento druh provozu dovoluje odbavit větší počet letadel, a tedy zvýšit propustnost dráhového systému. Ačkoliv nezávislý provoz mohl být využíván již v roce 2015, letiště však z hlukových postupů fungovalo za paralelního provozu.

Studie také navrhovala myšlenku, že nezávislý provoz by mohl být výhodný z důvodu výcviku personálu řízení letového provozu pro provoz s třemi drahami. V momentě, kdy bude nová dráha připravená pro provoz, by letiště díky tomuto kroku bylo připravené na takový provoz.

Všechny čtyři výše zmíněné výzkumy vytváří ucelený obraz o simulaci letištního provozu, případně o simulaci využívání letištní infrastruktury lidmi. V této kapitole došlo k rozebrání možných přístupů k hodnocení propustnosti různých částí letiště, dále bylo zmíněno, jakými simulačními nástroji je možné tyto simulace vytvářet spolu se závěry jednotlivých výzkumů. Všechny zmíněné výzkumy využívaly čistě softwarové nástroje, kdy na základě vstupních dat a vytvořeného simulačního prostředí poskytovaly výsledná data.

Zajímavý výzkum však provedli na univerzitě v Magdeburgu v Německu, kde do simulace zapojili i lidský faktor. Simulaci totiž provedli za pomoci počítačové hry, k čemuž použili simulační platformu ACCES. V tomto směru mohou být hry zajímavým řešením, jelikož podle řešení jednotlivých situací v herním prostředí se dá zkoumat chování lidí v takových situacích. V případě určité situace lze totiž uvažovat, že řešení daného problému nebude podle přednastaveného vzorce, ale bude spontánní, a v případě porovnání výsledků mezi větším počtem subjektů se dá očekávat vysoká diverzita. [15]

Pro experiment bylo vybráno virtuální prostředí letiště Hamburk. Simulace provozu probíhala na reálných datech z 25. května 2004. Pro účely experimentu byly vytvořeny dva scénáře. První scénář zahrnoval sníženou kapacitu letiště. Kapacita letiště byla snížena z důvodu mlhy, a tedy špatného počasí, což v praxi znamenalo snížení maximálního počtu pohybů letadel v daném časovém úseku. V druhém případě byl provoz na letišti ovlivněn dočasným krátkodobým uzavřením celého letiště z důvodu bouřky. V obou případech byl požadavek udržet co nejvyšší možný provoz a zároveň v daném časovém období udržet minimální počet 21 odletů a nepřekročit tak maximální povolenou délku zpoždění.



Zkoumanými proměnnými v experimentu byl styl komunikace a využití možnosti powerwallu. Powerwall je stěna, kam jsou promítány informace tak, aby byly dostupné pro všechny účastníky experimentu. Výsledné hodnoty simulací pak byly porovnávány pro zmíněné scénáře podle matice 2 x 2 v závislosti na tom, zda byl použit powerwall či nikoliv a zda probíhala komunikace mezi zúčastněnými subjekty přímo nebo skrz počítačové prostředí.

Sledovanými parametry při experimentu byla míra sdílení dat mezi subjekty a jejich situační povědomí, schopnost plánování a řešení definovaných scénářů, efekt sdílení informací mezi subjekty za pomoci powerwallu a proces komunikace a výhodnost možnosti přímého dohadování mezi subjekty za účelem efektivnějšího řešení nastalé situace.

Závěr z provedeného experimentu ukázal, že přímá interakce mezi subjekty může vést k efektivnějšímu řešení nepříznivých podmínek daných okolními vlivy. Zároveň tato metoda může vést ke zlepšení situačního povědomí. Případná spolupráce mezi subjekty také má za následek větší odhodlanost dokončit nebo zvládnout řešený úkol. Zmíněný powerwall pak přináší benefit ve formě lepší orientace při řešení daného úkolu a sám o sobě vybízí k větší míře vzájemné komunikace mezi subjekty.

Ve spojitosti s touto diplomovou prací je poměrně zajímavé si uvědomit, že tímto způsobem může do simulace letištního provozu být integrován lidský faktor, což má bezesporu za následek ovlivnění výsledků simulace. V určitých případech může lidský faktor mít za následek horší výsledky než samotná softwarová simulace. V takovém případě se dá usoudit, že je řešení simulačního nástroje efektivnější. V jiných situacích může však být člověk v řešení nastalých situací naopak efektivnější než počítač.

Pokud bychom lidský faktor použili při simulaci běžného provozu, dost pravděpodobně jeho výsledky v porovnání s počítačem budou horší. Jelikož pokud se jedná o rutinní úkony, dá se počítač považovat za přesnější a efektivnější. Výhoda začlenění lidského faktoru je však při řešení nestandardních situací, kdy člověk může přijít s originálním řešením, které může být efektivnější než to, které bude provedeno daným softwarem. Takto byl postaven právě i poslední uvedený experiment, kdy se za pomoci lidského faktoru řešily scénáře snížení kapacity a uzavření letiště z důvodu špatného počasí, což se v obou případech jedná bezesporu o nestandardní situace.



5. Simulační platforma

V minulé kapitole bylo objasněno, že v dnešní době je využití simulačního prostředí pro predikci vývoje nebo pro vizualizaci požadovaného scénáře běžnou záležitostí. V praxi tato metoda je znatelně levnější, v určitých případech bezpečnější a v jiných případech může být dokonce jedinou možností v případě, kdy požadovanou situaci v reálném světě není možné nasimulovat.

V letectví a konkrétně v této práci nabývá simulace všech výše zmíněných výhod. Pokud je záměrem hodnocení propustnosti dráhového systému na daném letišti, v případě této diplomové práce na letišti v Praze, tak je zřejmé, že simulace bude znatelně méně náročná než testovat maximální propustnost dráhy v reálném provozu. Zároveň díky simulačnímu softwaru je možné simulovat provoz na jeho limitech, což by nebylo v praxi možné, protože by nemusela tímto být zajištěná potřebná úroveň bezpečnosti provozu. V neposlední řadě, jak bylo zmíněno, díky simulaci se dají testovat scénáře, které se v praxi nepoužívají, nebo se nedají provést.

Dále v předchozí kapitole došlo ke zmínění různých simulačních platform. Samozřejmě se jednalo pouze o pár z mnoha existujících. Každá taková platforma má svoje výhody a nevýhody, podle čehož si ji autoři výzkumu vyberou.

V případě této diplomové práce byla vybrána platforma AnyLogic. Tato platforma byla vybrána, jelikož poskytuje široké možnosti ve virtuálním modelování. Dalším důvodem je, že model vytvořený za účelem hodnocení propustnosti dráhového systému navazuje na práci „Hodnocení propustnosti letištní infrastruktury a způsobených zpoždění letadel“ z roku 2021 jejíž autorem je Ing. Petr Had. [18] Dále by pak model měl být součástí detailního modelu celého letiště Praha, kde se ostatními částmi letiště zabývají další studenti projektu Moderní trendy rozvoje letišť, kde je tento celkový model vyvíjen právě v programu AnyLogic.

5.1. AnyLogic – teorie

AnyLogic je simulační software, za jehož vývojem stojí americká společnost The AnyLogic Company. Tento software je využitelný pro celou řadu počítačových simulací. Jako příklady, kde se tento software dá použít, lze uvést dopravu, těžbu, vlakovou a lodní dopravu, organizace skladů, dodavatelské řetězce a další. [16, 17]

V této práci bude software AnyLogic použit pro hodnocení propustnosti dráhového systému, což tedy znamená, že bude použit pro modelování provozu v oblasti dráhy. Není náhodou, že ve výčtu příkladů možného využití této simulační platformy chybí právě letecká doprava. Program AnyLogic totiž v sobě neobsahuje leteckou knihovnu. Z toho plyne, že pro simulaci bude v této práci využita železniční knihovna, kdy právě tato knihovna bude substituovat tu



leteckou. Obecně při pohybu letadel po provozních plochách letišť je totiž možné přistupovat k simulaci způsobem, jako by se jednalo právě o vlaky, kdy logika simulace železničního a leteckého provozu je téměř totožná. V modelu tedy budou pojezdové dráhy a dráhy pro vzlet nahrazeny kolejemi.

Program AnyLogic nabízí uživatelům možnost simulace ve dvou vzájemně propojených úrovních. Jedná se o logickou část a grafickou část. V případě této práce se v grafické části nachází vytvořený model letiště. V logické části jsou pak blokové diagramy, funkce a další prvky, které definují jednotlivé procesy v modelu. [16, 17]

AnyLogic umožňuje uživatelům použít pro tvorbu simulace tři různé metody. Jedná se o:

- Modelování systémové dynamiky
- Modelování za pomoci agentů
- Modelování diskrétních událostí

Každá z těchto metod poskytuje různou míru abstrakce při modelování. Agentní modelování poskytuje největší rozpětí použití míry abstrakce. Je tedy na autorovi, zda si vybere možnost pracovat ve vysoce abstraktním prostředí nebo zcela naopak v případě, kdy si zvolí agentní metodu. V tomto odstavci byla zmíněna pouze metoda agentního modelování, a to právě z důvodu, že tato stejná metoda byla zvolena i pro simulaci provozu v oblasti dráhového systému v této diplomové práci.

5.1.1. Agentní modelování

Jedná se o nejnovější metodu modelování v programu AnyLogic. Tato metoda je založena na vytvoření agentů a následně jejich vzájemné komunikaci. V rámci nastavení simulačního prostředí je agentům udělen soubor vstupních informací, tedy je jim definováno jejich chování v rámci systému. Po spuštění simulace lze pak následně pozorovat a zkoumat chování agentů v celém systému na základě vymodelovaného prostředí a vstupních informací. Zde je vhodné zmínit, že agent nemusí být nutně jeden samostatný, ale může se jednat o populaci agentů, kteří sdílejí společné chování tak, jak bylo nastaveno při tvorbě modelu. [16, 17]

Výhodou takového řešení pro tuto diplomovou práci je právě možnost vzájemné komunikace vytvořených agentů mezi sebou. Dále se jedná o možnost využití populace agentů, kdy právě například letadla budou v modelu vedena jako populace agentů a bude tak možné, aby jejich chování v rámci modelu bylo definováno obecně. Zároveň tento druh modelování je vhodný i pro vybranou železniční knihovnu.

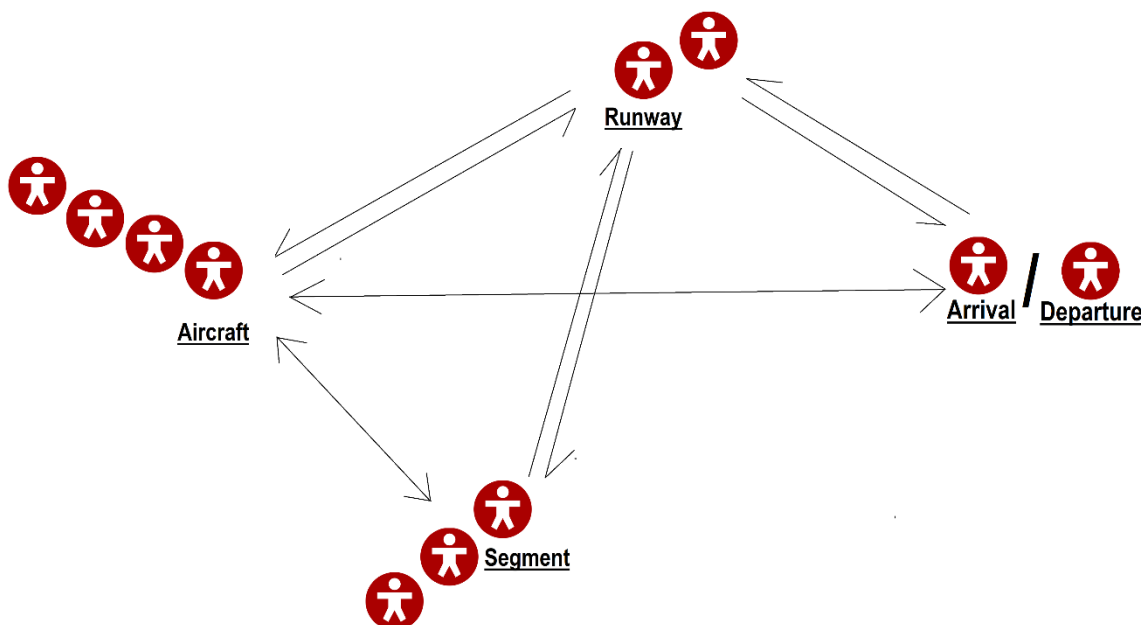
V neposlední řadě je důvodem pro využití agentního modelování i právě výše zmíněná návaznost na práci Ing. Petra Hada, který ve své práci toto agentní modelování použil a tento model, stejně jako ostatní modely v rámci tohoto projektu, respektují tuto volbu. [18]

5.2. AnyLogic – model

V předchozích kapitolách byl popsán AnyLogic a přiblíženy možnosti simulace v tomto prostředí. Tato kapitola bude zaměřena detailněji na popis modelu, který byl vytvořen pro účely simulace této diplomové práce.

5.2.1. Popis Modelu

Obecně lze uvést, že tento model vznikl metodou multiagentního modelování. Zjednodušeně by se tedy dalo říct, že základními prvky modelu jsou definovaní agenti. Pro lepší představu je schéma agentů znázorněno na Obrázku 5.



Obrázek 5 Schéma aktuálního modelu.

Na obrázku 5 jsou znázorněny dva druhy komunikace mezi agenty. V případě, kdy se jedná o dvě šipky vedle sebe, se jedná o proces řízení a opačným směrem získávání informací. Pokud je šipka pouze jedna, pak na této spojnici probíhá přímé obousměrné sdílení informací. Druhy komunikace jsou rozlišeny zejména pro lepší demonstraci funkčnosti modelu. Velmi podstatným faktem je, že v modelu dochází nejen ke komunikaci mezi agenty, jak je znázorněno na obrázku 5, ale dochází i ke komunikaci mezi jednotlivými agenty v rámci populace.

Pro lepší pochopení obrázku 5 je výhodnější začít popis od spodního agenta Segment. Tento agent v sobě obsahuje parametry, které přísluší dráze. Jedná se zejména o informaci o aktivní dráze v používání pro vzlet a přistání, o počtu dráhových segmentů potřebných pro vzlet nebo přistání, maximální rychlosti pro sjezd letadla na dané odbočce a dalších. Zjednodušeně by se tedy dalo říct, že agent Segment řeší pohyb letadel na zemi.



Dalšími agenty jsou Arrival a Departure. Tito agenti mají za úkol řídit letadlo ve fázi přiblížení a přistání a ve fázi odletu. Pomocí těchto agentů jsou pro přistávající letadlo definovány parametry pro přistání, jako je například jeho přibližovací rychlost a další. Na stejném principu jsou generovány příslušné parametry pro odlet.

Tito dva agenti nemají za cíl pouze generování parametrů, ale současně i měří parametry jednotlivých letadel, která přistávají. Jedná se o parametry, které nejsou dané a existuje mezi nimi diverzita. Jako příklad lze uvést reálnou rychlost letadla při opuštění dráhy a čas, za který dráhu opustil. Zmíněné parametry nejsou načítány z databáze a vyplynou až z konkrétní situace, což je i cílem. Jelikož i v případě, kdybychom tyto parametry v reálném provozu měřili u stejného letadla se stejnou přistávací hmotností a za totožného počasí, tak se budou o malou hodnotu lišit. Cílem je to zejména proto, že je takto reflektován reálný provoz a je tak zároveň i zajištěno, že výsledky simulaci nebudou při opakování pokusu shodné, jelikož tímto způsobem zde vždy bude existovat jistá náhodnost.

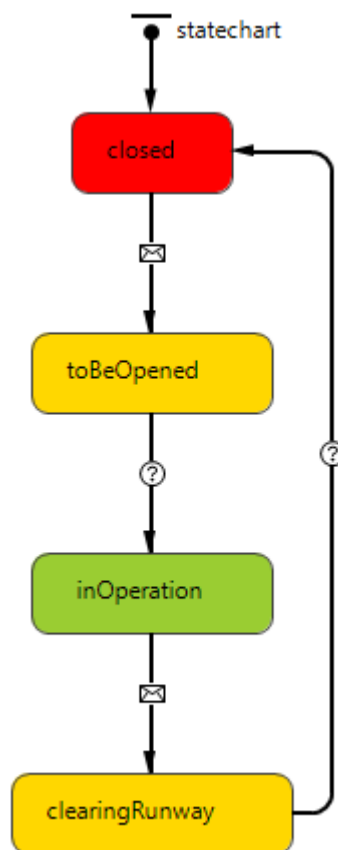
Dalším v pořadí na obrázku 5 je agent Aircraft. Jedná se konkrétně o populaci agentů, což reflektuje soubor více letadel, pro která jsou v tomto agentovi načítány jejich vlastnosti. V tomto případě jsou načítány informace z vytvořených databází. Jedná se o informace o ICAO kódu letadla, ICAO kategorii, kategorii podle turbulence v úplavu, délce trupu a rozpětí křídel. Agent Aircraft zároveň poskytuje informace o aktuální poloze.

Na vrcholu diagramu je záměrně agent Runway. Tento agent má řídicí funkci. Se všemi ostatními agenty komunikuje, tak jak je znázorněno na obrázku 5. Šipka směrem od agenta Runway značí, že agent řídí provoz v okolí dráhy a jeho okolí. Mimo to však agent Runway shromažďuje informace o přilétávajících a odlétávajících letadlech a shromažďuje i informace o obsazenosti dráhy, což je na obrázku 5 označeno právě opačnou šipkou. Agent Runway zároveň dává povolení pro přistání nebo pro vzlet. Symbol dvou agentů Runway symbolizuje fakt, že existují dvě dráhy na letišti v Praze. Jedná se o dráhy 12/30 a 06/24, což se opět dá považovat za populaci agentů. Zároveň je velmi podstatné zmínit, že dochází i ke komunikaci v rámci této populace agentů, a to z důvodu křížení těchto dvou drah. Tím pádem se jedná o závislý provoz a pokud bychom zvažovali scénář, kdy by byly aktivně používány obě dráhy, je potřeba, aby probíhala i komunikace mezi nimi.

Pro lepší pochopení by se za paralelu k agentovi Runway dalo v reálném provozu považovat ATC. Existuje zde však jeden zásadní rozdíl. V reálném provozu řízení letového provozu získává informace o letadlech pomocí různých informačních systémů, které jsou na pracovištích jednotlivých řídicích dostupná, bez nutnosti se na tyto informace letadel dotazovat. Takto informace však v simulaci není možné distribuovat.

Ačkoliv podle obrázku 5 se může zdát, že informace jsou k agentovi Runway šířeny na jeho dotaz, tak to tak není. Agent Runway je v tomto případě závislý na distribuci informací ostatními agenty. V praxi to pak znamená, že letadlo, člen populace Aircraft, samo informuje agenta Runway o svém aktuálním stavu.

Jedním ze zajímavých atributů agenta Runway je možnost rozhodnout o dráze, která je na letišti aktuálně používána. Případné změny dráhy v používání dosáhne agent pomocí blokové sekvence, která je znázorněna na obrázku 6.



Obrázek 6 Blokovaná sekvence pro změnu dráhy v agentu Runway.

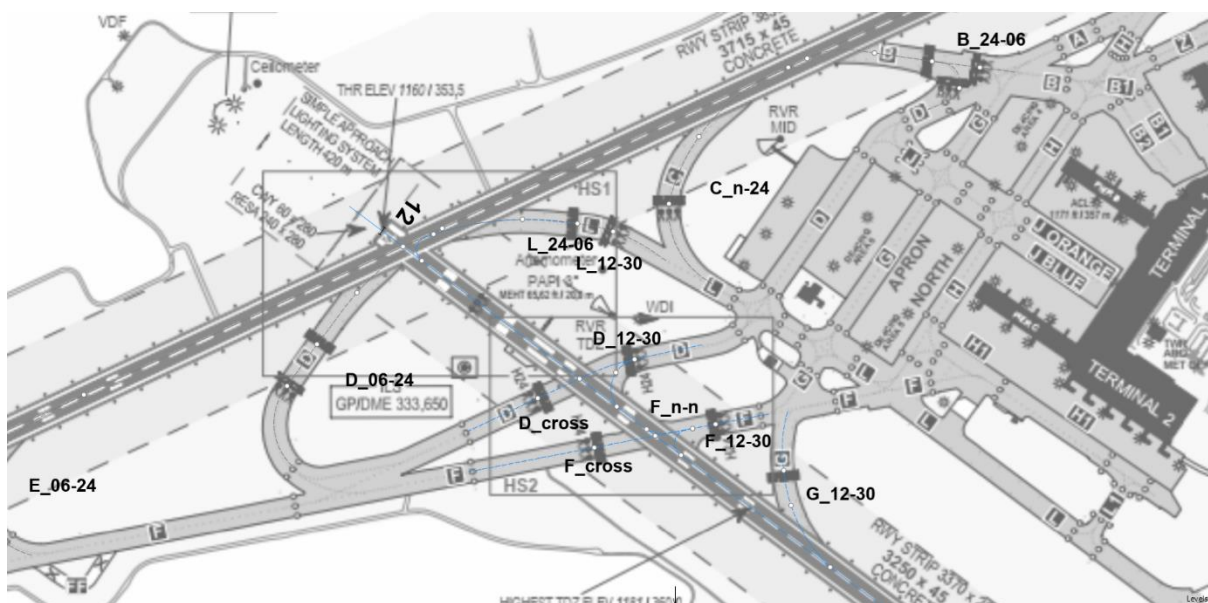
Sekvence je v modelu použita v případě, kdy existuje žádost o otevření uzavřené dráhy. Tato žádost může být generována ve chvíli, kdy se při simulaci vybere v nabídce nová dráha, případně podle předem nastaveného časového okamžiku. V tu chvíli přejde uzavřená dráha do stavu, kdy bude otevřena. Následně se vyšle dotaz, zda je opačný směr dráhy uzavřený. To znamená v případě dráhy 24 by byl vyslán dotaz, zda je uzavřena dráha 06, aby nedošlo k situaci, kdy by letadla přistávala na stejnou dráhu z opačného směru. Pokud je tato podmínka splněna, dráha přejde do stavu, kdy je v provozu. V tu chvíli se vyšle další zpráva pro dráhu, která byla do tohoto momentu v používání, že se bude zavírat. V poslední fázi, po odbavení posledních letadel v sekvenci na tuto dráhu, dojde k jejímu definitivnímu uzavření.

5.2.2. Grafická část

Grafická část modelu je vymodelována v agentovi Main. Jedná se o repliku v simulačním prostředí dráhového a pojezdového systému na letišti v Praze včetně pohybu letadel v rámci tohoto systému. Pro potřeby této práce se jedná o dráhu pro vzlety a přistání letadel a pojezdové dráhy používané pro výjezd z aktivní dráhy. Ostatní části infrastruktury letiště nejsou obsaženy v tomto modelu, jelikož nejsou potřebné, čímž je zároveň znatelně snížena velikost celého souboru.

Model infrastruktury vychází z práce Ing. Petra Hada, avšak byl upraven, jak bylo zmíněno v předešlém odstavci. [18] To znamená, že došlo ke smazání podstatné části pojezdového systému, která nebyla potřeba pro simulaci provozu v oblasti dráhy. Taktéž došlo k odstranění všech odbavovacích ploch. Část modelu, která byla použita, musela být opravena tak, aby rozměry drah 12/30 a 06/24 odpovídaly skutečným hodnotám dle zvoleného měřítká, jelikož v původní práci nebyly vzdálenosti zcela správné.

Pro lepší orientaci byl v agentu Main přidán mapový podklad z aktuální verze publikace AIP. Detaily grafického zpracování modelu jsou představeny na obrázku 7.



Obrázek 7 Grafické zpracování letištní infrastruktury pro účel hodnocení propustnosti dráhového systému na letišti v Praze (PRG/LKPR). [3] (upraveno autorem)

Na obrázku 7 je patrné, že pro každou dráhu byla zvolena jiná barva, aby bylo zřetelné ke které dráze náleží konkrétní část infrastruktury. Pro dráhu 06/24 byla zvolena šedá barva a pro dráhu 12/30 světle modrá.

Grafický model v simulaci má za cíl vizuálně demonstrovat, co se v aktuálním čase v simulaci děje. Například lze ve vizualizaci simulovat pohyb lidí v terminálu tak, jak bylo zmíněno ve čtvrté kapitole v experimentu španělské univerzity. V tomto modelu bude v grafické části



simulován pohyb letadel. Letadlo se v modelu fyzicky objeví zhruba 100 metrů před prahem dráhy a v modelu bude figurovat až do sjezdu z dráhy, kdy na definovaném bodě opustí model.

Velmi důležité však je uvědomit si, že díky grafické části modelu se samotné letadlo v našem případě objeví fyzicky. To však ale neznamena, že letadlo se v simulaci objevuje pouze v tomto úseku. Ve skutečnosti dané letadlo existuje v modelu ještě před a po jeho fyzickém výskytu v modelu, avšak pouze v jeho logické části. Logická část modelu bude rozebrána detailněji v další kapitole.

5.2.3. Logická část

Logická část modelu má zjednodušeně řečeno za úkol řízení jednotlivých procesů v modelu. V předchozí kapitole bylo zmíněno využití grafické části. Pomocí ní je v modelu vytvořeno prostředí pro simulaci. V logické části je definováno, jakým způsobem se v modelu jednotlivé objekty chovají. Toto chování jednotlivých objektů je specifikováno v jednotlivých agentech za pomoci funkcí, dynamických událostí a dalších prostředků neboli řečeno za pomoci logických procesů. Takový logický proces byl již demonstrován v kapitole 5.2.1. na obrázku 6, kdy zde byl detailněji popsán proces změny aktivní dráhy. To však je jeden z mnoha procesů, které jsou definovány v tomto modelu.

Pro lepší pochopení lze jednotlivé procesy znázornit stavovými diagramy. V modelu jsou stěžejní zejména procesy probíhající za účelem příletu a odletu letadla. V této kapitole bude pro demonstraci detailně rozebrán logický proces příletu a přistání letadla.

Přílet letadla je proces, díky kterému letadlo vstupuje do modelu. Schéma funkce pro přílet je graficky znázorněno na obrázku 8. Uvodní blok zabezpečuje vstup letadla do celého procesu.

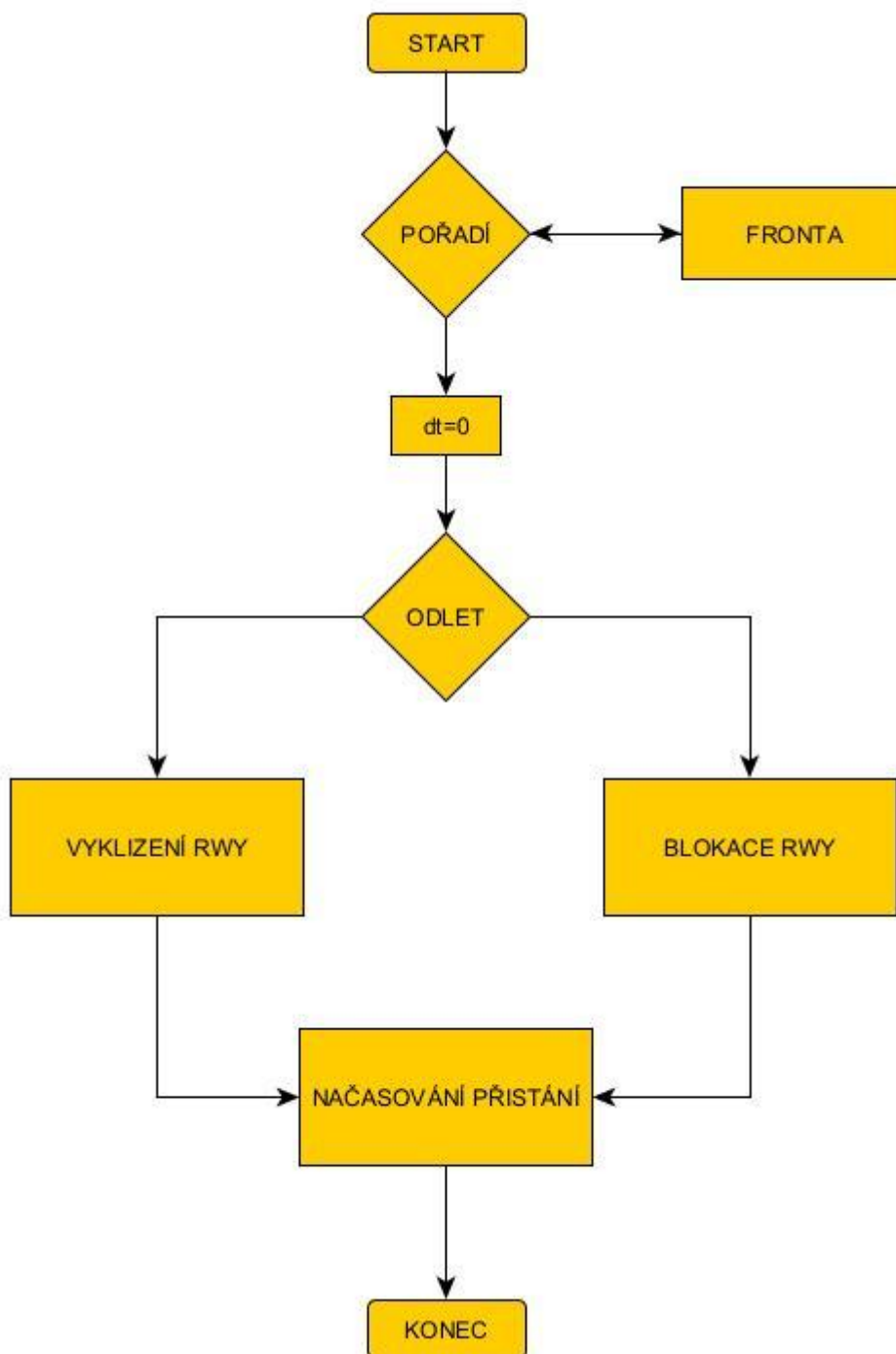
Následuje blok POŘADÍ. Zde na základě pořadí letadla je dále postupováno v modelu. Dále v modelu lze postupovat pouze v případě, kdy je dané letadlo první na řadě pro přistání. V případě kdy není první, je letadlo zařazeno do fronty pro přistání. Fronta se vždy po opustění letadla, které v danou chvíli bylo první, posune o další letadlo. Letadla tedy přistávají v pořadí, ve kterém vstoupila do modelu.

Blokem $dt=0$ se rozumí proměnná pro načasování přistání. To znamená, že v danou chvíli je přistání načasováno na 0 vteřin.

V bloku ODLET je řešeno, zda v aktuální chvíli probíhá nějaký odlet. Pokud na odletu nečeká žádné letadlo, bude postupováno podle pravé větve schématu. V takovém případě dojde k blokaci dráhy pro přistávající letadlo a zároveň bude vyslán dotaz na separaci v závislosti na předešlém letadle. Jak bylo rozebráno v teoretické části této práce, vždy musí být zajištěna separace mezi přistávajícími letadly. V případě, kdy přistává letadlo vyšší váhové kategorie,

tato separace musí být ještě navíc zvýšena kvůli turbulenci v úplavu, kterou po sobě zanechává každé letadlo.

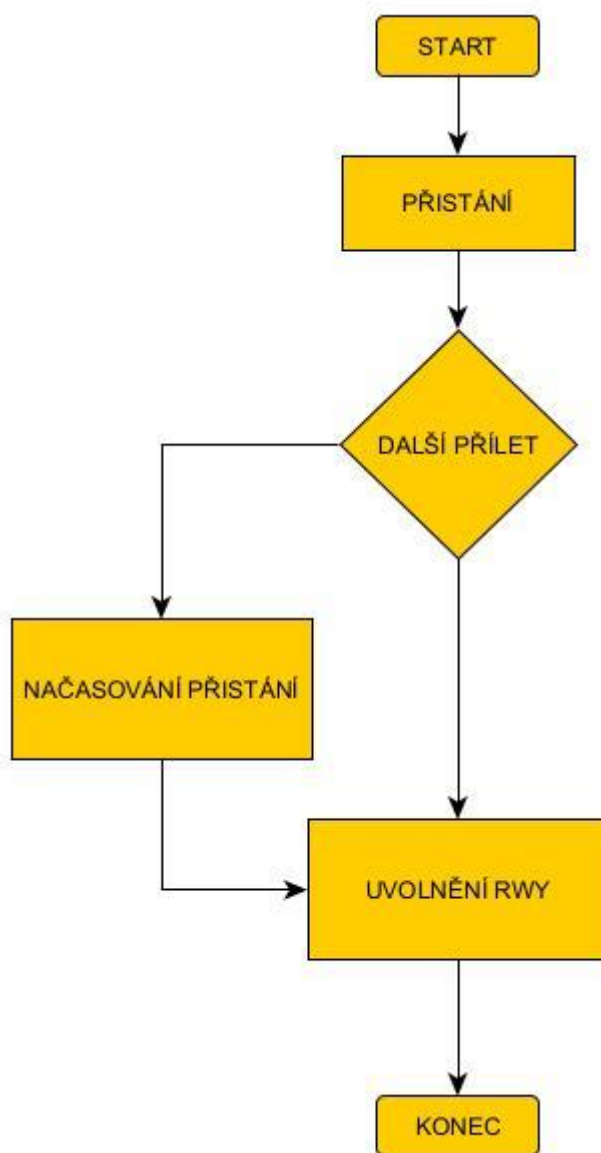
Druhým případem je varianta, kdy bude plánován odlet letadla. V takovém případě budou mít přednost všechna letadla, která již mají naplanovaný vzlet. Konkrétně se jedná vždy o první letadlo na daném vyčkávacím místě. V tomto případě dojde ke zjištění potřebného času na vzlet letadla ve frontě.



Obrázek 8 Schéma funkce pro přilet letadla.

Pro proběhnutí všech potřebných výpočtů a zjištění všech potřebných údajů, tedy zjištění, za jak dlouho bude volná dráha, a výpočtu separace, je pro první letadlo ve frontě načasováno přistání. To je znázorněno předposledním blokem ve schématu na obrázku 8. Posledním blokem je konec procesu. Z toho plyne, že přistání je vždy načasováno pouze prvnímu letadlu ve frontě na přistání. Zároveň dochází vždy automaticky k určení času potřebného na dráze pro vzlet pro všechna odlétavající letadla, která jsou pouze na prvním místě na daném vyčkávacím místě tak, aby tato informace byla dostupná a mohla být k dispozici pro načasování příletu.

Na schéma proces příletu letadla navazuje přistání. Přistání letadla je popsáno schématem na obrázku 9.



Obrázek 9 Schéma dynamické události pro přilet letadla.



Ve fázi přistání letadlo vstupuje fyzicky do modelu. Prvním blokem je opět začátek celého procesu. V tomto bodě je dané letadlo odebráno z fronty na příletu. Zároveň je nastavena dynamika letadla na dráze. Dynamikou letadla se rozumí jeho chování neboli místo dotyku, decelerace a další parametry. Sočasně je toto letadlo zaznamenáno do seznamu jako poslední, které přistálo. Tento krok je důležitý pro určení separace na základě kategorie dle turbulence v úplavu.

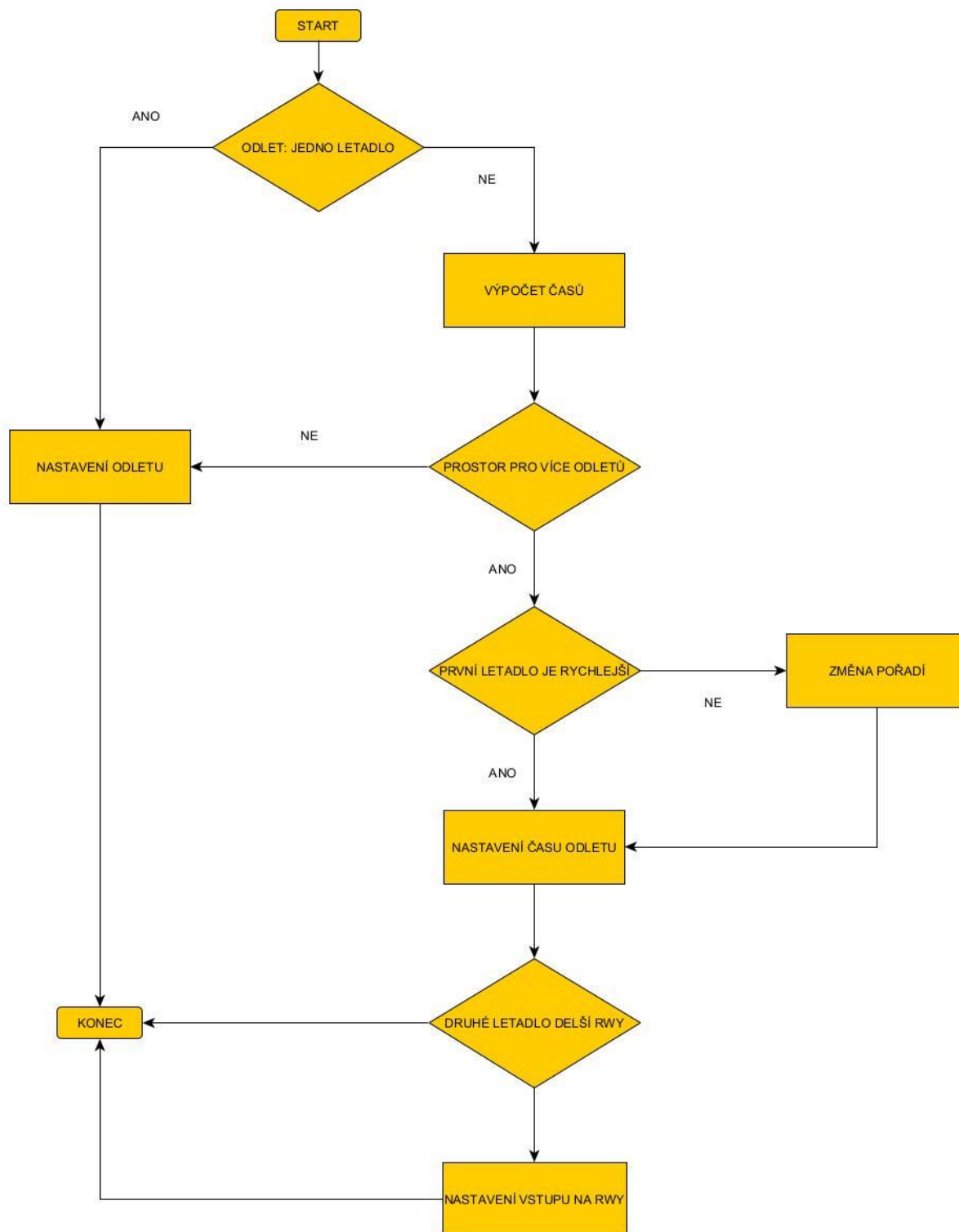
Následně je v procesu vyhodnoceno, zda je v pořadí další přílet. Pokud není žádný další přílet, dojde k nastavení podmínky povolení pro vstup na dráhu a odlet. Podmínkami se v tomto případě rozumí definování vstupu na dráhu. Existuje několik možných variant. Pokud je obsazeno pouze jedno vyčkávací místo, pak letadlo na něm dostane povolení pouze pro vstup na dráhu v momentě, kdy přistávající letadlo se nachází za bodem, kam odlétající letadlo bude najíždět. Povolení pro vzlet je uděleno až v momentě, kdy letadlo po přistání uvolní dráhu. Stejně jako v běžném provozu je tak šetřen čas potřebný pro najetí letadla na dráhu.

Jak již bylo zmíněno, existuje více možných scénářů, které je možné i simulovat. Na každém vyčkávacím místě může být na řadě pouze jedno letadlo z hlediska modelu. To znamená, že ve frontě může být letadel nekonečno, avšak model uvažuje pro odlet pouze prvního. Další letadlo bude uvažováno až v momentě, kdy to předešlé najede na dráhu. V reálném provozu ve frontě může být pouze omezený počet letadel v závislosti na kapacitě pojezdových drah, což však tato práce neřeší. Možností, kdy může být více letadel na odlet, je v momentě, kdy je každé letadlo na jiném vyčkávacím místě. V případě dráhy 24 je tento scénář často viditelný, kdy jedno letadlo je na vyčkávacím místě A a druhé na místě B. V takovém případě model vyhodnotí, zda se mezi přílety vejdou obě letadla nebo jen jedno a popřípadě které.

Z předešlého odstavce je jasné, že existuje situace, kdy čekají na odlet dvě letadla na dvou vyčkávacích místech. V momentě, kdy model vyhodnotí, že se letadla do sekvence vejdou obě, tak je oběma povoleno najet na dráhu v momentě, kdy přistávající letadlo uvolní daný segment, kam letadla budou najíždět. Následně pak odletí nejdříve letadlo s menší dostupnou dráhou pro vzlet tak, aby nedošlo ke kolizi. Povolení pro vzlet může být uděleno již během nájezdu na dráhu. Odlet druhého letadla je naplánován podle doby, kterou potřebuje první letadlo pro odlet a tedy pro UVOLNĚNÍ DRÁHY.

V momentě, kdy je ve frontě na přistání další letadlo, dojde k načasování dalšího přistání v závislosti na době potřebné pro UVOLNĚNÍ DRÁHY odlétávajícím letadlem. Tím končí proces přistání letadla.

Jak bylo naznačeno výše, tak proces udělování povolení na dráhu je v modelu složitějším algoritmem. Jeho detailní zpracování je naznačeno v schématu na obrázku 10.



Obrázek 10 Schéma pro vstup letadla na dráhu.

Z obrázku 10 vyplývá, že pro proces odletu letadla existují dvě větve. Rozhodujícím faktorem je počet letadel čekajících na odlet. Pokud na odlet čeká pouze jedno letadlo, je naplánování odletu jednodušší. V takovém případě dojde k určení času, kdy bude letadlo schopné zahájit



vzlet. Tento údaj je určen na základě informací o přistávajícím letadle. Následně je určen čas potřebný pro provedení vzletu. Dále podle přistávajícího letadla je tomu odlétajícímu uděleno povolení pro najetí na dráhu a po uvolnění dráhy i pro vzlet. Tím celá sekvence končí.

Komplikovanějším případem je moment, kdy na odletu je více než jedno letadlo. Pro vysvětlení budou nyní uvažována dvě letadla na vzlet. V případě většího počtu letadel by došlo k dalšímu větvení procesu.

V případě dvou letadel čekajících na odlet dojde k určení času, za jak dlouho by mohla letadla zahájit vzlet. Dále je vypočítán i celkový čas, který bude potřeba, než dojde k uvolnění dráhy. Tento čas se skládá z čekání na přistání letadla, tedy čekání na volnou dráhu, aby mohlo dojít k nějaké akci. K tomuto je přičten čas potřebné separace na vzlet od druhého letadla, které čeká na vzlet a ještě se přičte čas vzletu druhého letadla. Celá rovnice pro obě letadla se dá rozepsat takto:

Celkový čas letadla 1 (2) = čas, kdy bude možné zahájit vzlet + separace od letadla 2 (1) + čas strávený na dráze letadla 2 (1).

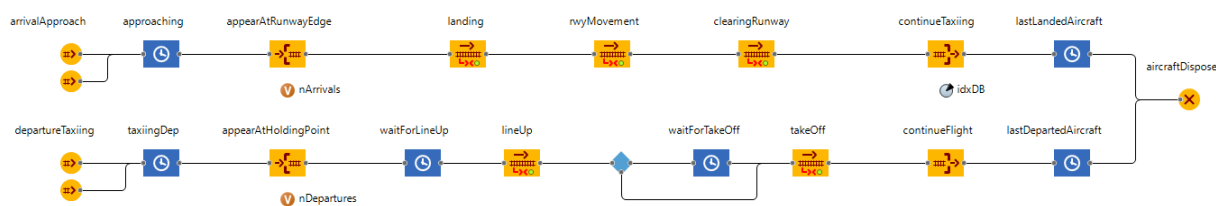
Pokud je dostatečný čas pro obě letadla v sekvenci, tak je dále vyhodnoceno, které z letadel dokáže odlétnout rychleji. Pokud by první letadlo bylo pomalejší, dojde ke změně pořadí. Následně jsou zaznamenány časy, kdy letadla opustí vzletovou dráhu a je jim nastavena podmínka pro najetí na dráhu.

V dalším kroku dojde k porovnání délky dráhy, kterou má každé letadlo k dispozici. Díky tomu je jasné, že v případě, kdy druhé letadlo bude mít k dispozici delší dráhu pro rozjezd, tak se fyzicky bude nacházet za prvním letadlem. Pokud je tato podmínka splněna, tak ve chvíli, kdy bude dráha volná, mohou vstoupit na dráhu obě letadla. Následně odletí první letadlo a druhé bude stále čekat na dráze, dokud nedojde k jejímu uvolnění.

Po odletu druhého letadla tato sekvence končí a na řadě je pravděpodobně další přílet. Když by v tomto případě byla fronta pro přílety prázdná, dojde k dalšímu odletu.

V této podkapitole byla rozebrána logická část celého modelu. Byl věnován důraz na přílet a přistání letadla. Odlet nebyl rozebrán pomocí schématu, nicméně zde byla přiblížena logika pro udělení vstupu na dráhu a tedy fáze, která přímo předchází odletu letadla. Samotný odlet již není nutné takto detailně rozebírat jako přílet, avšak pro úplnost je dobré uvést, že k uvolnění dráhy při odletu dochází v momentě, kdy odlétající letadlo překročí opačný konec dráhy, než odkud se rozjelo. V tu chvíli získává dráha status, že je volná. Nicméně stále je potřeba brát do úvahy separace mezi letadly.

Součástí agenta Main, spolu s grafickou částí modelu, je vývojový diagram, které řídí pohyb letadel v modelu v rámci logické části modelu. Vývojový diagram je znázorněn na obrázku 11.



Obrázek 11 Vývojový diagram logické modelu.

Vývojový diagram je rozdělen do dvou větví. Jedna větev v modelu řídí přílety letadel a druhá odlety. Všechny bloky tohoto diagramu na obrázku 11 jsou zvoleny ze železniční knihovny. Pro lepší pochopení vývojového diagramu je nejprve potřeba popsat jednotlivé využití bloky.

Prvním blokem je Source. Tento blok slouží k fyzickému zavedení zvoleného dopravního prostředku do vizualizace, tedy k jeho vygenerování v modelu. I přesto, že se jedná o bloky ze železniční knihovny, nemusí se nutně jednat o vlak. V případě tohoto modelu je dopravním prostředkem letadlo, které se pohybuje v grafickém výstupu modelu. V tomto modelu jsou bloky Source dva. Jeden tento blok generuje letadla na příletu a druhý generuje letadla na odletu. Bloky jsou nazvány jako arrivalApproach a departureTaxiing. Tyto názvy odkazují na fakt, že letadla na příletu jsou generována ve fázi přiblížení a letadla na odletu jsou generována ve fázi pojíždění na vyčkávací místo dráhy.

Delay je dalším typem bloku. V tomto vývojovém diagramu se nachází na několika místech. Jedná se o místa, kde letadlo v daný okamžik na něco čeká. V příletové větvi je první Delay blok pojmenován approaching. V tomto bloku se nachází letadla, která byla vygenerována a čekají na zařazení do sekvence pro přistání. V odletové větvi se nachází Delay blok rovněž přímo za blokem Source. V tomto případě reprezentuje blok letadla čekající ve frontě na vyčkávacím místě pro odlet.

Dalšími bloky v pořadí v obou větvích jsou bloky Train Enter. Tyto bloky zajišťují fyzický vstup letadla do simulace. V tomto okamžiku se dané letadlo objeví právě v rámci grafického modelu. Jednoduše řečeno, v tuto chvíli je možné pozorovat letadlo v modelu. V příletové větvi se letadlo objeví v momentě přeletu prahu dráhy. Během odletu se letadlo objeví v momentě, kdy dosáhne polohy vyčkávacího místa. Takové letadlo je na každém vyčkávacím místě fyzicky v modelu pouze jedno. Ostatní letadla ve frontě se fyzicky objeví právě v momentě, kdy dosáhnou vyčkávacího místa jako první.



V odletové větvi hned po bloku Train Enter následuje další blok Delay, který reprezentuje letadla čekající na vyčkávacím místě. Na každém vyčkávacím místě může být vždy pouze jedno letadlo.

Následně se v obou větvích vyskytuje blok Train Move To. Tento blok se používá k přesunu objektů v simulaci z předešlého místa na to následující. V příletové větvi je blok Move To nazvaný Landing využit pro přesunutí letadla z přiblížení na dráhu. Následuje další blok stejného typu, v rámci kterého se uskuteční pohyb letadla po dráze při přistání. Poté další blok Move To má na starost vyjetí letadla z dráhy.

V odletové větvi po Delay bloku je za pomoci bloku Move To provedeno najetí letadla na dráhu. Následuje opět Delay blok, díky kterému je v simulaci zajištěno možné čekání letadla na odlet na dráze. Následně za pomoci dalšího bloku Move To letadlo provede vzlet.

Posledními bloky v obou větvích ze železniční knihovny jsou bloky Train Exit. V těchto blocích dojde k fyzickému zmizení letadel ze simulace. V odletové větvi je tento blok nazván continueFlight a v příletové continueTaxiing. Tyto bloky jsou následovány dalšími bloky Delay z důvodů potřeby získání informací o odlétajícím a přistávajícím letadle pro další letadla ve frontě.

Posledním blokem je pak blok Dispose, díky kterému se dostává letadlo zcela pryč ze simulace.

Nyní v této kapitole byla detailně rozebrána funkčnost Logické části modelu dráhového systému na letišti v Praze. Zjednodušeně by se dalo říct, že vývojový diagram, který byl popsán jako poslední, skrývá v jednotlivých blocích řadu funkcí a dalších procesů, které řídí daný proces, pro který byl blok vytvořen. Příklady těchto funkcí, dynamických událostí a další byly popsány v této kapitole právě před vývojovým diagramem. Tyto funkce a další podobné části modelu lze chápat jako jednotlivé prvky zmíněných bloků. Vzájemná provázanost těchto jednotlivých funkcí lze následně popsat pomocí schémat, která byla rovněž představena a popsána v rámci této podkapitoly.



5.3. Data pro simulaci

Cílem této diplomové práce je hodnocení propustnosti dráhového systému na letišti v Praze. Pro splnění tohoto cíle je potřeba mít správně fungující model. Z toho důvodu je potřeba mít data potřebná ke správnému nastavení modelu. Pro provedení simulace a nastavení modelu jsou nezbytná vstupní data. Tato vstupní data byla vyžádána od Letiště Praha.

Pro nastavení modelu je potřeba velké množství dat. Proto na získaných datech byla provedena analýza, podle které následně bylo za pomoci nástrojů simulačního modelu Anylogic nastaveno chování letadel v rámci modelu.

Žádaná a obdržená data pro simulaci byla následující:

- Datum a čas letu
- Typ letadla
- Doba pojíždění před odletem
- Doba pojíždění po příletu
- Dráha pro odlet
- Dráha pro přílet
- Pojezdová dráha použitá pro najetí na dráhu
- Pojezdová dráha použitá pro sjezd z dráhy
- Doba strávená na dráze
- Čas vzletu
- TOBT
- AOBT
- TSAT
- CTOT

Z bližší analýzy výše uvedených dat je následně možné získat potřebná vstupní data do modelu. Velmi důležité je zmínit, že výše uvedená data byla použita pouze pro nastavení modelu. Takto získaná data nejsou sama o sobě vstupním souborem do modelu a v samotném modelu v původním formátu nijak nefigurují. Data byla využita pro analýzu a následně podle této analýzy došlo k nastavení chování letadel v modelu. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, model generuje přílety a odlety sám, a tudíž není potřeba data použít jako vstup do modelu.

Prvním krokem při analýze získaných dat bylo rozdělení letadel do kategorií podle typu letadla. Tento krok byl zvolen z důvodu, jelikož nastavení rychlostí a dalších parametrů jednotlivých letadel v simulaci je realizováno právě v závislosti na jejich kategorii. Není totiž možné konkrétně definovat parametry pro každé letadlo zvlášť. Současně v reálném provozu dochází k tomu, že jedno a to samé letadlo má své parametry, mezi které patří například zmíněná rychlost, pro každý let odlišné. Proto tedy různým letadlům, která se mohou za provozu vyskytnout, byla nejprve přiřazena jejich kategorie. Kategorie letadla byla určena podle tabulky 8 tak, jak bylo zmíněno v kapitole 3.4.1. Jinými slovy model tedy obsahuje seznam



velkého množství letadel. Z tohoto seznamu jsou letadla pro účely simulace generována. A ke každému takovému letadlu jsou vygenerovány zároveň i jeho vlastnosti podle tabulky 3.4.1. Jako příklad je možné uvést letadlo Boeing B737, které má přiřazenou kategorii C, tudíž bude mít rychlost nad prahem dráhy v rozmezí 121 a 140 uzlů. Vzhledem k tomu, že se jedná o simulace reálného provozu, kdy dané letadlo bude mít tuto rychlost pokaždé jinou v rámci zmíněného rozmezí, je mu tato rychlost nastavena náhodně podle zvoleného statistického rozložení. Dále jsou k jednotlivým typům letadel přiřazeny jejich rozměry, tedy délka trupu a rozpětí křídel, aby v modelu měli reálné rozměry.

První krok analýzy, zmíněný v předešlém odstavci, byl proveden nezávisle na datech z letiště Praha. Jednalo se spíše o vytvoření databáze pro simulační model, aby mohl generovat určitá letadla. V dalším kroku již bylo pracováno se získanými daty z letiště. Je důležité zmínit, že získaná data byla z března roku 2023 a ze srpna roku 2023. Jedná se tedy o aktuální data v obou případech v délce trvání jednoho týdne. Tato dvě časová období byla zvolena z jistého důvodu, a to mít k dispozici data ze sezónního a mimosezónního provozu. V tabulce 11 jsou porovnány počty pohybů jednotlivých letadel rozdělených podle kategorií na časovém horizontu jednoho týdne.

Tabulka 11 Skladba týdenního provozu na letišti Praha.

Kategorie	03/2023		08/2023	
	Počet	%	Počet	%
A	90	5,30	102	3,81
B	167	9,84	172	6,43
C	1388	81,79	2325	86,88
D	52	3,07	77	2,88
E	0	0	0	0
Celkem	1697	100	2676	100

Pro správné nastavení dynamiky pohybu letadel na dráze bylo využito získaných dat času stráveného na dráze (RWY Occupancy Time). Tento čas byl definován pro každou kategorii letadel zvlášť. Konkrétně bylo vytvořena statistika minimálního, průměrného a maximálního času stráveného na dráze podle kategorie a mediánu. Zároveň byla tato data zkoumána zvlášť pro přílety a zvlášť pro odlety. Tato statistika je zpracována v tabulce 12 pro březnová data a v tabulce 13 pro srpnová data.

Tabulka 12 Čas strávený na dráze pro březnová data.

Kategorie	RWY Occupancy time (s)							
	DEP_min	DEP_avg	DEP_med	DEP_max	ARR_min	ARR_avg	ARR_med	ARR_max
A	47	99	84	222	41	59	56	115
B	45	84	72	169	37	56	53	192
C	45	96	93	272	35	57	58	148
D	56	90	92	173	44	58	59	82
E	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabulka 13 Čas strávený na dráze pro srpnová data.

Kategorie	RWY Occupancy time (s)							
	DEP_min	DEP_avg	DEP_med	DEP_max	ARR_min	ARR_avg	ARR_med	ARR_max
A	37	89	80	181	37	52	49	88
B	42	86	75	219	0	46	46	69
C	48	97	95	313	31	54	54	120
D	60	86	86	128	42	58	62	83
E	0	0	0	0	0	0	0	0

Data v tabulkách 12 a 13 ukazují, že pokud dojde na porovnání průměrů a mediánů časů strávených na dráze za březen a srpen, tak se pro odlety i přílety znatelně neliší. Nejvíce podobné jsou tyto hodnoty v případě kategorie C. To je způsobeno tím, že tato kategorie je v provozu na letišti v Praze zastoupena nejvíce, což plyne i z tabulky 11. Naopak menší rozdíly jsou patrné v méně zastoupených kategoriích. Zejména se jedná o kategorie A, ale i o kategorii D. U kategorie A je to dáno zároveň i velkými rozdíly parametrů mezi jednotlivými typy letadel.

Další důležitou statistikou pro nastavení chování letadel v modelu je analýza použitého sjezdu pro uvolnění dráhy nebo najetí na dráhu. Tato statistika je zpracována v tabulce 14 pro březnová data a v tabulce 15 pro srpnová data.

Tabulka 14 Pojezdové dráhy pro uvolnění a najetí na dráhu pro březnová data.

Kategorie	Nájezd na RWY24				Výjezd z RWY 24			
	A	B	L	Z	C	D	E	F
A	24,00%	68,00%	8,00%	0,00%	79,00%	18,00%	0,00%	3,00%
B	28,00%	70,00%	1,00%	1,00%	90,00%	9,00%	0,00%	1,00%
C	81,00%	14,00%	1,00%	4,00%	31,00%	67,00%	1,00%	1,00%
D	39,30%	3,50%	0,00%	57,20%	20,80%	75,00%	4,20%	0,00%
E	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

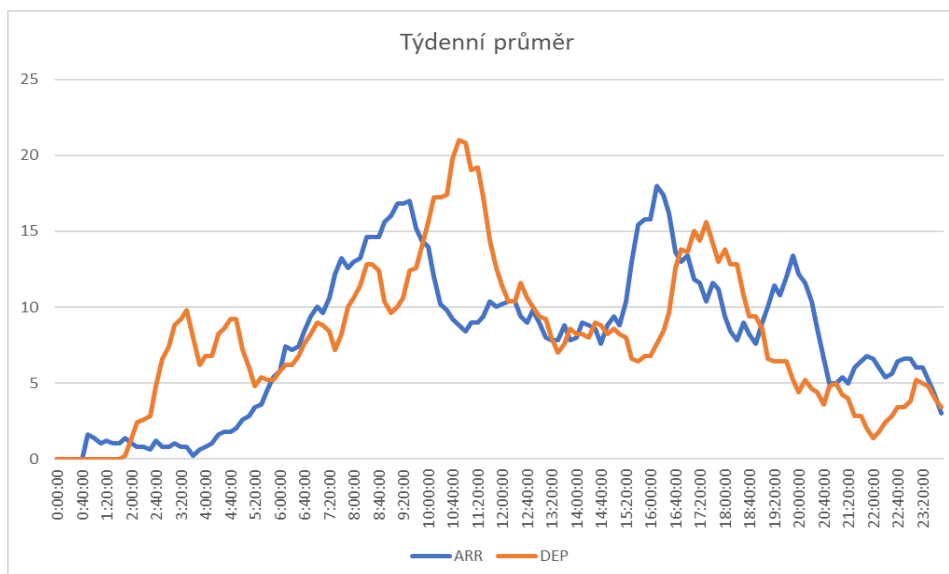
Tabulka 15 Pojezdové dráhy pro uvolnění a najetí na dráhu pro sprnová data.

Kategorie	Nájezd na RWY24				Výjezd z RWY 24			
	A	B	L	Z	C	D	E	F
A	22,00%	72,00%	4,00%	2,00%	94,00%	4,00%	0,00%	2,00%
B	27,00%	72,00%	1,00%	0,00%	92,00%	7,00%	0,00%	1,00%
C	85,00%	11,00%	1,00%	3,00%	16,00%	82,00%	1,00%	1,00%
D	48,65%	2,70%	0,00%	48,65%	10,00%	77,50%	7,50%	5,00%
E	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Z provedené analýzy je patrné, že pro vyjetí z dráhy 24 jsou nejvíce frekventované sjezdy C a D. Pro vstup na dráhu jsou to naopak A a B. V tomto případě je anomálií kategorie letadel D, která v případě obou zkoumaných časových období využívá pojezdovou dráhu Z pro vstup na dráhu znatelně častěji oproti jiným kategoriím. Při provedení bližší analýzy bylo zjištěno, že se jedná převážně o nákladní letadla, pro která je tato pojezdová dráha výhodnější vzhledem k poloze jejich odbavovacích stání. Zároveň je také vidět, že obě tabulky obsahují data pouze pro dráhu 24. To je z toho důvodu, že dráha 24 je podle preferenčního dráhového systému na letišti v Praze, detailně popsaného v kapitole 3.1.3., hlavní drahou a v obou zkoumaných časových obdobích se používala pouze zmíněná dráha 24.

Analýza zpracovaná v tabulkách 11, 12, 13, 14 a 15 disponuje velmi důležitými údaji, které vypovídají o chování letadel na dráze. Ve zbytku textu této kapitoly bude věnován prostor analýze, která zkoumala provoz na letišti. První takovou statistikou bylo rozdělení jednotlivých pohybů v rámci dne do desetiminutových intervalů. Zároveň došlo i k rozdělení pohybů na odlety a přílety. Pro každý den byly údaje vneseny do grafu a následně byly tyto grafy pro každý den zprůměrovány do jednoho týdenního grafu na obrázku 12.

Na obrázku 12 je jasně patrné, ve který čas je provoz intenzivní a naopak, které části dne jsou méně vytížené. Oranžovou barvou jsou značeny odlety a modrou přílety. V grafu je patrné, že v nočních hodinách je na letišti nízký provoz. Důvodem je omezení počtu příletů a odletů tak, jak to bylo popsáno v kapitole 3.1.2. První špička nastává brzy ráno zhruba ve 2 hodiny, kdy začínají odlétat první letadla, která byla přes noc na letišti. Zhruba okolo sedmé hodiny se začíná zvyšovat počet příletů, na což plynule navazuje postupné zvýšení odletů. Jedná se právě o ta stejná letadla, která po jejich průletu pokračují zpět do původní nebo nové další destinace. Téměř identický jev se následně objevuje krátce před třetí hodinou odpoledne. Postupem času s blížícím se večerem provoz na letišti slábne a zhruba okolo osmé hodiny večerní je pozorována poslední špička v počtu příletů. V tomto případě již nenavazuje přímo špička odletů, jelikož pravděpodobně se jedná právě o letadla, která odlétají brzy ráno.



Obrázek 12 Zprůměrovaný týdenní provoz na letišti Praha.

Tímto byla vyčerpána analýza dat, která byla poskytnuta letišťem Praha. Díky těmto datům je možné nastavit chování modelu a všech objektů a procesů, které se v tomto modelu vyskytují daleko přesněji oproti případu, kdyby tato data dostupná nebyla a musela by se tvorba simulačního modelu provést bez nich.



6. Simulace a Validace

V této kapitole je popsána simulace, která byla provedena v rámci několika simulačních scénářů, které byly navrženy tak, aby bylo možné díky těmto scénářům provést i validaci modelu, a tedy ověřit funkčnost modelu.

6.1. Přílety

Prvním simulačním scénářem je simulace pouze odletů z dráhy 24 na letišti v Praze. Odlety jsou simulovány po dobu 4 hodin. Tato simulace byla opakována celkem šestkrát. Simulace slouží k validaci požadavků na separaci mezi letadly. Zároveň také simulace definovala na základě vstupních dat propustnost dráhového systému v případě, kdy by na letišti probíhaly pouze odlety. První simulace, označena pořadovým číslem 0, byla provedena s rovnoměrným rozložením letadel podle ICAO kategorie. Za pomoci této konkrétní simulace lze lépe ověřit různé kombinace příletů, které by měly dodržovat separace podle tabulky 6, která byla blíže popsána v kapitole 3.2.1. Výsledkem simulace bylo, že minimální rozestupy odpovídaly tabulce 6. V závislosti na rychlosti letounů, které za sebou přistávaly splňoval rozestup vždy legislativní minimum nebo byl o něco vyšší. Odlety v modelu je tedy možné označit za správné a validaci za úspěšnou.

Dalších 5 simulací bylo provedeno s reálným rozložením letadel. Výsledky těchto simulací jsou shrnuty v tabulce 16.

Tabulka 16 Výsledky simulace příletů na dráhu 24 na LKPR.

Simulace	ICAO Kategorie										Celkem	Hodinový provoz
	A		B		C		D		E			
	Počet	%	Počet	%	Počet	%	Počet	%	Počet	%		
1	11	8,46	12	9,23	106	81,54	1	0,77	0	0,00	130	32,5
2	9	6,87	7	5,34	115	87,79	0	0,00	0	0,00	131	32,75
3	6	4,32	5	3,60	122	87,77	6	4,32	0	0,00	139	34,75
4	10	7,69	4	3,08	114	87,69	2	1,54	0	0,00	130	32,5
5	7	5,00	4	2,86	127	90,71	2	1,43	0	0,00	140	35
Průměr	8,6	6,47	6,4	4,82	116,8	87,10	2,2	1,61	0	0,00	134	33,5

Z tabulky 16 je patrné, že distribuce letadel podle ICAO kategorie odpovídá tabulce 11, a tedy skladbě týdenního provozu reálných dat z letiště Praha. Tímto je tedy model opět validován. Za výsledek této simulace je považována hodnota 33,5 letadel za hodinu během hodinového provozu. Tímto tedy model ukázal, že maximální propustnost dráhového systému na letišti v Praze při skladbě provozu letadel pouze na odletu je právě tato hodnota. V tomto případě je nutné podotknout, že velmi závisí na složení provozu. Hodnota 33,5 je výsledkem pro provoz



založený na datech z letiště, a tedy s konkrétním rozložením podle kategorií. V případě simulace s číslem nula, která byla použita pro validaci separací letadel mezi sebou, byl provoz rozdělen rovnoměrně a propustnost dráhového systému byla 23,75. To je způsobeno jiným složením provozu. V této simulaci se ve srovnání se simulacemi 1 až 5 nacházelo více letadel kategorií A, B a D. Naopak menší počet byl u kategorie C. Tím pádem docházelo k případům, kdy letělo velké letadlo před malým výrazně častěji než u simulací založených na reálném provozu. V případech zmíněných v předchozí větě musí být dodržena větší separace, což má za následek snížení kapacity dráhového systému. A právě to se projevilo i na samotné simulaci.

Posledním údajem, kterým lze model validovat, je údaj o použitém sjezdu pro opuštění dráhy po přistání. U kategorií A a B se jednalo v naprosté většině o sjezd C, což zcela odpovídá tabulce 14, kde je tato statistika zpracována z reálných dat provozu letiště Praha. V případě kategorie letadel C nebyla patrná jednoznačná dominance určitého sjezdu. Z velké části se jednalo o sjezd D a méně zastoupen byl sjezd C, což rovněž při porovnání s tabulkou 14 potvrzuje správnost modelu. U kategorie D je patrné, že v simulaci, stejně jako v reálném provozu, je zastoupena méně. V případě této kategorie se jednalo zejména o sjezd přes pojezdovou dráhu D. Tím, že odpovídá využití pojezdových drah pro sjezd z dráhy reality, se dá dynamika letadel v modelu považovat za správnou.

6.2. Odlety

Druhým simulačním scénářem byla simulace pouze odletů. Pro výsledky této simulace je komplikovanější validace dat. Důvodem je nedostatečné množství dat pro ověření funkčnosti modelu. Separace na odletu totiž závisí nejen na separaci z důvodu turbulence v úplavu za předcházejícím letadlem, ale jsou dodržovány i v závislosti na odletové trase a na bodu, kdy letadlo opustí prodlouženou osu dráhy a na dalších parametrech, které letiště nesleduje.

Z toho důvodu nelze s jistotou potvrdit naprostou správnost modelu v této fázi. Avšak pro udržování separací byla nastavena pravidla v souvislosti s předpisem podle kapitoly 3.2.1. v této práci. Dále pro chování letadel na dráze byla použita stejná dynamika jako pro přistávající letadla. V předchozím simulačním scénáři v rámci validace modelu bylo prokázáno, že pro přílety takto nastavená dynamika pohybu letadel fungovala.

Výsledkem simulace odletů je tabulka 17. Zde je vidět maximální kapacita dráhy pro odlety a jejich procentuální rozložení. Z této tabulky je evidentní, že rozložení letadel je stejně jako u příletů odpovídající reálným datům z provozu letiště. V tomto směru tedy můžeme označit data za úspěšně validovaná. Jak již bylo zmíněno výše, tak pro validaci separací mezi letadly nejsou k dispozici dostatečná data.

Tabulka 17 Výsledky simulace odletů na dráhu 24 na LKPR.

Simulace	ICAO Kategorie										Celkem	Hodinový provoz
	A		B		C		D		E			
	Počet	%	Počet	%	Počet	%	Počet	%	Počet	%		
1	11	6,67	11	6,67	137	83,03	6	3,64	0	0,00	165	41,25
2	10	6,02	10	6,02	139	83,73	7	4,21	0	0,00	166	41,5
3	11	6,63	10	6,02	140	84,34	5	3,01	0	0,00	166	41,5
4	12	7,27	5	3,03	144	87,27	4	2,42	0	0,00	165	41,25
5	12	7,50	11	6,88	130	81,25	7	4,37	0	0,00	160	40
Průměr	11,2	6,82	9,4	5,72	138	83,93	5,8	3,53	0,0	0,00	164,4	41,1

Z tabulky 17 vyplývá, že simulace odletů stanovila maximální hodnotu propustnosti dráhového systému na 41,1 pohybu za hodinu. Tato kapacita je, stejně jako při příletech, ovlivněna skladbou provozu. V tomto případě však i dalšími parametry jako je právě odletová trať. Na tom je závislé, jak dlouho musí letadla mezi sebou udržovat rozestup a jaká separace je dodržována.

Tyto simulace byly zaměřené pouze na jeden typ provozu. Jednalo se pouze o přílety nebo pouze o odlety. V dalších simulačních scénářích je již simulován smíšený provoz odletů a příletů. Než budou popsány další simulační scénáře, je potřeba nejprve zmínit možnosti simulace. Ve vytvořeném simulačním prostředí je možné simulovat pouze přílety, odlety anebo jejich kombinaci. Provoz lze simulovat na různé dráhy na letišti. Současně je také možné si zvolit intenzitu provozu ve formě počtu pohybů. V případě prvních dvou scénářů byla zvolena nereálná intenzita, kdy určitý počet letadel zvládla dráha odbavit a zbytek se do simulace nevešel. Tímto způsobem byla určena maximální kapacita. Další možností je pak volba poměru příletů a odletů. Tím lze simulovat stanovený počet příletů a odletů za hodinu.

6.3. Kombinace příletů a odletů v poměru 50:50 na dráhu 24

Třetím simulačním scénářem byla simulace příletů a odletů v poměru 50:50 nebo tedy 1:1. Tento scénář má za cíl simulovat maximální kapacitu dráhového systému ve smíšeném provozu, jelikož právě pokud bude na vstupu do modelu stejný počet příletů a odletů, tak model vyhodnotí nejefektivnější konfiguraci provozu tak, aby kapacita byla co nejvyšší. Stejně jako ve scénářích jedna a dva bude počet letadel značně převyšovat kapacitu systému, a tudíž budou odbaveny pouze některé lety, což bude považováno za maximální kapacitu. Lety, které model nedokáže odbavit, nebudou vzaty v úvahu. V modelu tak skončí tato letadla ve fázi vyčkávání.

V tabulce 18 je znázorněno rozložení provozu rozdělené na přílety a odlety podle ICAO kategorií. Zkratka DEP značí počet odletů a zkratka ARR počet příletů v dané kategorii letadel.

Tabulka 18 Výsledky simulace kombinace příletů a odletů na dráhu 24 na LKPR.

Simulace	ICAO Kategorie										Celkem	Hodinový provoz
	A		B		C		D		E			
	DEP	ARR	DEP	ARR	DEP	ARR	DEP	ARR	DEP	ARR		
1	2	3	7	2	82	86	3	1	0	0	186	46,5
2	5	3	7	5	77	76	2	3	0	0	178	44,5
3	12	5	12	5	62	75	2	2	0	0	175	43,75
4	6	2	3	2	78	82	1	0	0	0	174	43,5
5	2	1	6	6	79	75	1	4	0	0	174	43,5
Průměr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	177,40	44,35

Při kombinaci příletů a odletů je průměrná maximální kapacita z 5 simulací 44,35 pohybů za hodinu. Ze simulací jasně vyplývá, že tato kapacita je opět přímo závislá na skladbě provozu. Nejvyšší průměrná kapacita dráhového systému je patrná v první simulaci, kdy hodnota maximálního počtu odbavených letadel byla 46,5. V tomto případě je vidět největší zastoupení kategorie letadel C. V dalších simulacích je provoz více rozložen mezi ostatní kategorie A, B a D. V tu chvíli vzniká potřeba pro větší separace mezi letadly, a tudíž dochází ke snížení kapacity.

Dalším zajímavým ukazatelem bylo pozorování střídání příletů a odletů. Model potvrdil, že nejvýhodnější pro maximální využití kapacity dráhového systému je střídat přílet a odlet. Pouze v pár případech se objevila situace, kdy model vyhodnotil, že je výhodnější povolit dva odlety po sobě. Tento případ však byl velmi ojedinělý. Možnost povolit dvě přistání za sebou se ani v jedné simulaci neobjevila.

6.4. Kombinace příletů a odletů v poměru 50:50 na dráhu 06

Čtvrtým simulačním scénářem byla simulace stejného druhu provozu jako v kapitole 6.3. Rozdílem je však dráha v používání. Cílem tohoto simulačního scénáře je porovnat výsledky s předchozím scénářem. Dráha 06 v Praze je opačná k dráze 24. Zpravidla tedy dojde k tomu, že pojezdové dráhy, které byly použity pro vstup na dráhu, budou v tomto scénáři využity pro její uvolnění a opačně.

Tabulka 19 obsahuje výsledky pěti simulací pro tuto opačnou dráhu k dráze 24. Stejně jako v předchozí kapitole jsou data sbírána podle jednotlivých ICAO kategorií letadel.

Tabulka 19 Výsledky simulace kombinace příletů a odletů na dráhu 06 na LKPR.

Simulace	Kategorie										Celkem	Hodinový provoz
	A		B		C		D		E			
	DEP	ARR	DEP	ARR	DEP	ARR	DEP	ARR	DEP	ARR		
1	6	2	8	10	65	66	1	1	0	0	159	39,75
2	4	6	3	4	70	68	4	1	0	0	160	40
3	8	6	5	6	66	67	1	1	0	0	160	40
4	5	2	2	3	71	71	1	2	0	0	157	39,25
5	9	1	6	3	61	72	2	3	0	0	157	39,25
Průměr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	158,60	39,65

V případě kombinace odletů a příletů na dráhu 06 je průměrná maximální propustnost dráhového systému z provedených pěti simulací 39,65 pohybů za hodinu. Ve srovnání s průměrem pro dráhu 24 lze pozorovat snížení maximální kapacity. Důvodů může být více, avšak tím nejpravděpodobnějším je konfigurace pojezdových drah pro vjezd a opuštění dráhy. V případě dráhy 24 se podle simulace jeví konfigurace pojezdového systému jako vhodnější pro rychlé uvolnění nebo pro rychlý vstup na dráhu. Možnými důvody může být nutnost větší decelerace na dráze 06 tak, aby letadlo pro výjezd z dráhy mělo nižší rychlost, dále samotné umístění pojezdových drah, kdy letadlo musí kvůli tomuto rozložení jet po dráze nižší rychlostí delší dobu a jinými faktory. Faktem je, že v reálném provozu je jako hlavní dráha používána právě 24, a tedy výhodnější konfigurace právě pro tuto dráhu má své opodstatnění.

6.5. Přílety a odlety s reálným provozem

Posledním simulačním scénářem je simulace provozu na základě reálných dat. Reálnými daty se v tomto případě rozumí, že na vstup do modelu bude přiveden počet příletů a odletů z týdenního průměru na základě grafu na obrázku 12 z kapitoly 5.3. Dále bude simulace probíhat s rozložením letadel podle jejich ICAO kategorie podle tabulky 11 ze stejné kapitoly. Konkrétní typy letadel však již budou náhodně generovány. Na rozdíl od všech předchozích scénářů bude v tomto případě simulováno 24 hodin, tedy jeden celý den, namísto 4 hodin jako u zbylých simulací.

Výsledkem simulace by měl být provoz, který bude při srovnání počtu pohybů v jednotlivých časech během dne odpovídat provozu, který je na letišti v Praze. Díky této simulaci bude možné ověřit, zda odpovídají časy na dráze (Runway Occupancy time) a volba pojezdové dráhy pro vstup a uvolnění dráhy. Srovnání bude provedeno s tabulkami 12, 13, 14 a 15. Tento simulační scénář má za úkol opět validovat funkčnost modelu na základě výše zmíněných parametrů. Výsledkem simulace bude pak následně vlastní graf zprůměrovaného provozu z těchto pěti simulací, který by měl odpovídat grafu z obrázku 12.

V tabulce 20 jsou demonstrovány časy strávené na dráze podle jednotlivých ICAO kategorií letadel.

Tabulka 20 Čas strávený na dráze pro jednotlivé kategorie letadel v pátém simulačním scénáři.

Kategorie	Počet	RWY Occupancy time (s)							
		DEP_min	DEP_avg	DEP_med	DEP_max	ARR_min	ARR_avg	ARR_med	ARR_max
A	19,6	72	90	83	132	61	64	63	71
B	21,2	65	80	72	163	53	60	58	134
C	341,6	60	83	74	283	49	56	54	128
D	8,2	59	89	83	207	45	49	48	53
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ve sloupci počet je uveden průměr počtu letadel ze všech pěti simulací dle jednotlivých kategorií. Pro minimální čas pro odlety (DEP_min) a přílety (ARR_min) je v tabulce vždy uveden nejnižší čas ze všech pěti simulací. Obdobně to samé platí pro maximální časy. Průměrné časy (DEP_avg a ARR_avg) a mediány (DEP_med a ARR_med) jsou průměrnými hodnotami pro všech pět simulací. Výsledné časy na dráze v tabulce 20 je možné porovnat s časy na dráze z reálného provozu letiště Praha v tabulkách 12 a 13. Průměrné hodnoty a mediány se ve většině případů neliší o více než deset vteřin. Tato odchylka může být způsobena zejména odlišným chováním letadel na dráze v simulaci a v reálném provozu. Příkladem může být, že letadlo dostane v simulaci pokyn pro vzlet, který provede okamžitě, zatímco v reálném provozu mu to může trvat déle, a to zejména pokud je zrovna na letišti malý provoz a pilot tak nemusí s provedením letu spěchat, což model nezohledňuje. Větší odchylky než deset vteřin se objevují u průměrů a mediánů také, ale to nastává pouze u kategorií, které se v modelu vyskytují velmi málo a opět není dostatek dat pro jejich přesnou simulaci. Tato data tak mohou být ovlivněna zrovna nastalou výjimečnou situací než provozním záměrem.

Dalším parametrem, na základě kterého je možné validovat model a určit, zda je funkční, je volba výjezdů pro uvolnění dráhy nebo pro najetí na ni. V současné době lze tuto analýzu provést pouze pro dráhu 24, jelikož data z reálného provozu byla za daná období k dispozici pouze pro tuto dráhu.

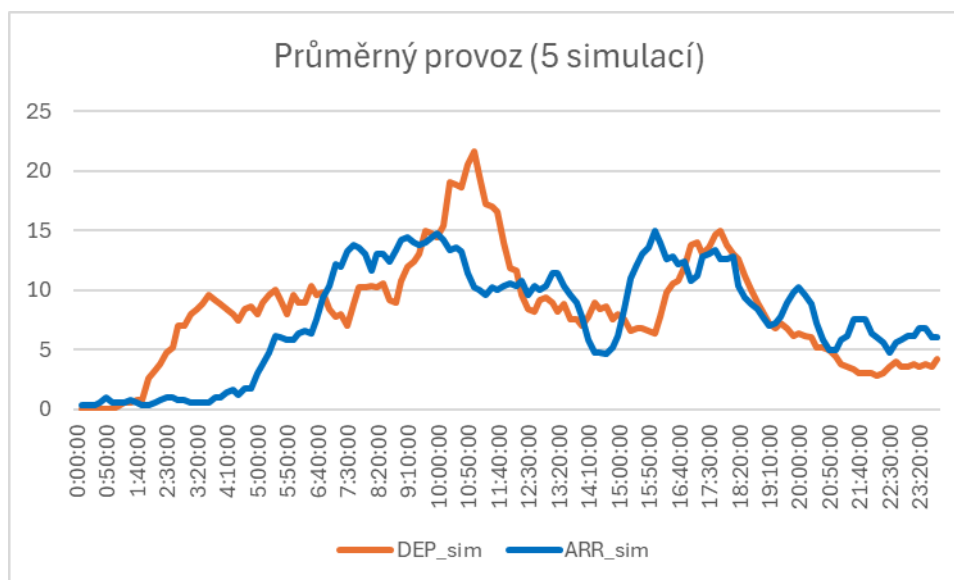
Pro nájezd na dráhu 24 slouží pojezdové dráhy Z, A, B a v ojedinělých případech L. Naopak pro sjezd z této dráhy se používá C, D, E nebo F. Využití jednotlivých pojezdových drah v rámci všech pěti simulací je znázorněno v tabulce 21. Na základě zprůměrování výsledků jednotlivých simulací byla do tabulky tato distribuce zpracována procentuálně.

Tabulka 21 Pojezdové dráhy pro uvolnění a najetí na dráhu během simulace.

Kategorie	Nájezd na RWY24				Výjezd z RWY 24			
	A	B	L	Z	C	D	E	F
A	35,29%	58,82%	5,89%	0,00%	87,23%	12,77%	0,00%	0,00%
B	26,23%	72,13%	0,00%	1,64%	91,11%	6,67%	0,00%	2,22%
C	79,34%	16,89%	0,00%	3,77%	31,73%	66,11%	0,84%	1,32%
D	39,50%	0,00%	0,00%	60,50%	34,80%	65,20%	0,00%	0,00%
E	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

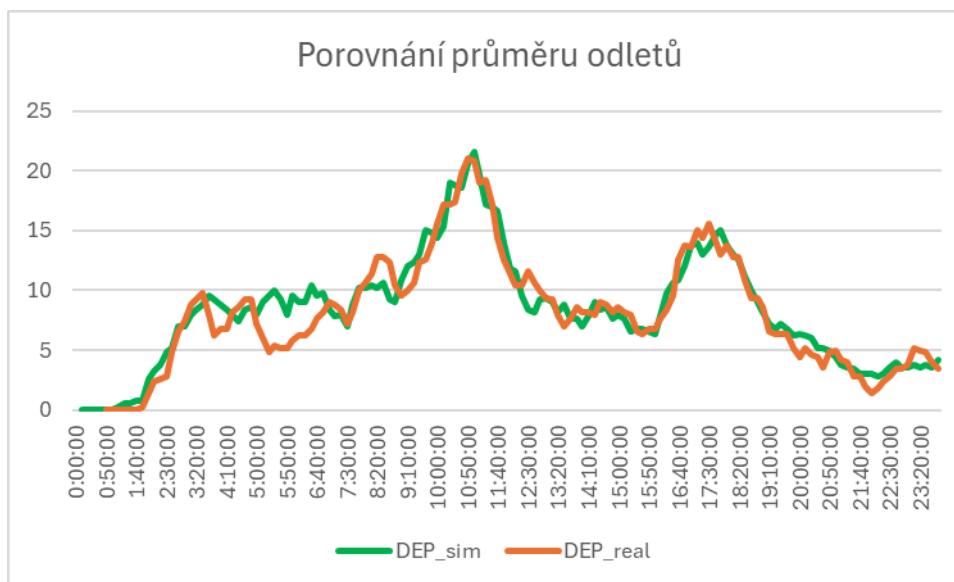
Při porovnání tabulky 21, kde jsou znázorněny výsledky simulací, s tabulkami 14 a 15, které obsahují data z reálného provozu, je patrné, že letadla využívají sjezdy v modelu velmi podobně jako v reálném provozu. Tudíž i v tomto kroku je možné označit model za validní, jelikož se chová z tohoto pohledu téměř totožně, jako je tomu za běžného provozu. Stejně jako v předchozí tabulce je však potřeba si uvědomit, že ne všechny kategorie letadel disponují dostatkem pohybů pro přesné výsledky. Opět se jedná zejména o kategorii D, která i v reálném provozu neměla v době sběru dat na letišti v Praze velké zastoupení.

Posledním krokem, jak bylo uvedeno na začátku této podkapitoly, je porovnání pohybů na letišti během 24 hodin s daty z reálného provozu v grafu na obrázku 12. Výsledkem simulace je graf na obrázku 13. Tento graf byl získán zprůměrováním výsledných hodnot ze všech pěti měření stejným způsobem, jako byl získán týdenní průměr z reálných dat.

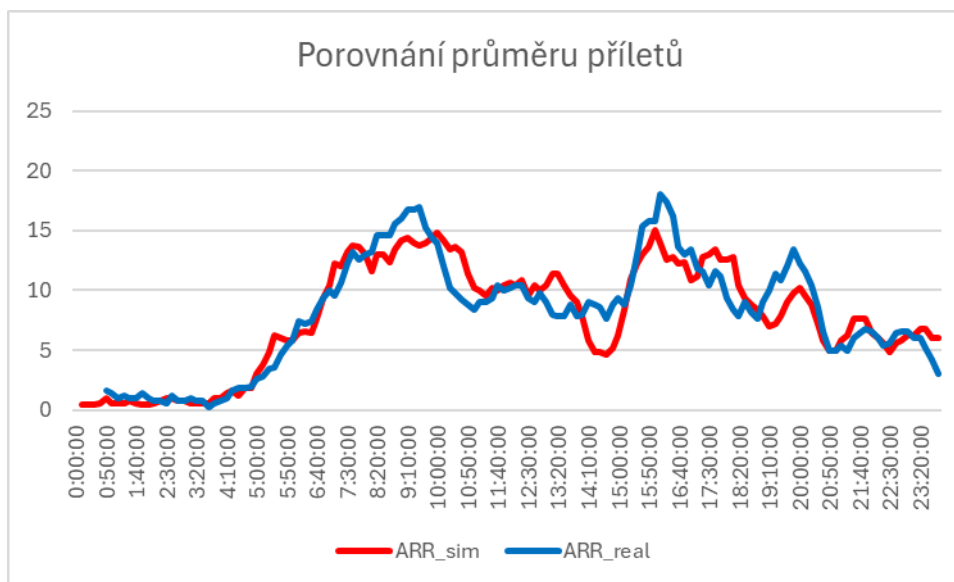


Obrázek 13 Zprůměrovaný provoz získaný z 5 simulací.

Na obrázku 13 jsou patrné špičky provozu, tak jako tomu bylo i na obrázku 12 při zpracování dat z reálného provozu. Opět je možné identifikovat dvě hlavní špičky provozu jak v případě odletů letadel, tak i u příletů. Pro snazší porovnání jsou v obrázku 14 spolu v jednom grafu data odletů ze simulace a z reálného provozu. Na obrázku 15 jsou pak stejným způsobem zpracována data příletů.



Obrázek 14 Porovnání průměru reálných a simulačních dat na odletu.



Obrázek 15 Porovnání průměru reálných a simulačních dat na příletu.

Na obrázku 14 jsou data z reálného provozu označena jako DEP_real a data ze simulace jsou označena DEP_sim. Obdobně tomu je v případě příletů na obrázku 15. Na obou grafech je patrné, že data ze simulace nejsou naprosto totožná jako ta reálná. To je dáno určitou variabilitou, která byla nastavena pro jednotlivé parametry letadel, čímž je zajištěno, že každá



simulace bude unikátní. Celkový trend však jak u příletů, tak i odletů ze simulace odpovídá reálnému provozu.

V rámci simulace a validace vytvořeného modelu bylo v této kapitole definováno pět provozních scénářů. Během těchto simulací bylo výsledkem určení maximální dráhové kapacity pro odlety, přílety a pro kombinaci. Ačkoliv je v modelu možné simulovat provoz na jakoukoliv dráhu, záměrně byla vybrána dráha 24, jelikož právě pro tuto dráhu byla k dispozici data z reálného provozu. Jeden ze simulačních scénářů zahrnoval provoz na dráhu 06 z důvodu porovnání výsledků právě s dráhou 24.

Výsledky maximální kapacity z jednotlivých simulačních scénářů byly:

- Pouze přílety na dráhu 24 – 33,5 pohybů za hodinu
- Pouze odlety na dráhu 24 – 41,1 pohybů za hodinu
- Kombinace příletů a odletů na dráhu 24 – 44,35 pohybů za hodinu
- Kombinace příletů a odletů na dráhu 06 – 39,65 pohybů za hodinu

Dráhová kapacita, kterou stanovilo letiště Praha, je uvedena v bakalářské práci, která byla publikována Fakultou dopravní ČVUT s názvem „Vliv aplikace sníženého minima rozstupu na trati konečného přiblížení na LKPR.“ [19] Zde je uvedeno, že dráhová kapacita je na letišti v Praze stanovena na 33 pohybů za hodinu, pokud je provoz složen pouze z odletů nebo příletů. V případě kombinovaného provozu kapacita dosahuje 46 pohybů za hodinu a ve zvláštních případech až 47.

V případě příletů na dráhu 24 bylo simulací dosaženo podobného výsledku. Kapacita odletů byla simulačním modelem spočítána na vyšší hodnotu, než uvádí letiště Praha. To může být následkem více faktorů. U odletů byl největší překážkou nedostatek potřebných dat pro simulaci, jak již bylo zmíněno v této kapitole. V kombinovaném provozu na dráhu 24 je výsledná kapacita o málo nižší, než kterou uvádí letiště. To může být způsobeno variabilitou v provozu nebo skladbou v provozu, což bude detailněji rozebráno v následující kapitole.



7. Diskuse

Pro účel zhodnocení kapacity dráhového systému bylo definováno v kapitole 6 pět provozních scénářů. Tyto scénáře měly za úkol naplnit podstatu práce a zhodnotit celkovou kapacitu a zároveň validovat model.

Ze získaných dat bylo možné prokázat, že model v současném nastavení je funkční. Nicméně i v tomto stavu má simulace provozu své určité limity. Hlavní limitací je, že z důvodu nedostatku dat pro ostatní dráhy bylo možné za pomoci simulace validovat model pouze na dráhu 24. Na ostatní dráhy je možné simulaci rovněž provést, nicméně v průběhu tvorby modelu nebyla k dispozici data, která by mohla validovat model i pro ostatní dráhy. Avšak podle výsledků, které potvrdily funkčnost modelu na hlavní dráhu, je pravděpodobné, že výsledky budou odpovídat i ve zbylých případech.

Další oblastí, kde byl problémem nedostatek dat z reálného provozu, je pohyb letadel ve vzduchu a na zemi. Právě nastavení dynamiky letadla v modelu byla jedna z nejvíce komplikovaných úloh v rámci tvorby simulačního modelu. Na rozdíl od dat z provozu na jiných drahách, které je možné získat v případě, kdy by požadovaná dráha byla v provozu, tak u dat potřebných pro nastavení dynamiky letadla, je problémem, že nedochází k jejich sledování v současné době vůbec, anebo jejich kolekce není vůbec možná. Jedná se například o přesný průběh rychlosti letadla během přiblížení. V případě stejného jednoho konkrétního letadla se může přibližovací rychlost podstatně lišit v závislosti na váze letadla, aktuálního větru a dalších faktorech. Tato informace by byla velmi přínosná pro ještě přesnější práci se separacemi mezi jednotlivými letadly. V současné době jsou tyto hodnoty generovány náhodně z databáze. Následně na dráze by tato informace byla přínosná pro přesnější nastavení decelerace letadla při přistání po dosednutí na dráhu a pro nastavení akcelerace při vzletu. V případě pohybu letadla po dráze by však sběr potřebných dat byl komplikovaný a rozsáhlý, protože v takovém případě závisí na ještě větším počtu informací než u přiblížení. Bylo by potřeba disponovat informacemi o váze letadla, síle použité během brzdění, stavu vozovky, použití reverzního tahu, mít aktuální informaci o teplotě, směru a síle větru a tlaku na letišti a dalších faktorech.

Mimo zmíněné faktory v předešlém odstavci je provoz ovlivněn i jeho skladbou. V rámci simulace definovaných provozních scénářů vyplynulo, že kapacita dráhy je velmi zásadně ovlivněna kategoriemi letadel. Výsledky simulací, jež byly zmíněny v šesté kapitole jsou platné pro skladbu provozu, který figuroval v poskytnutých datech. Konkrétně je myšlena skladba kategorií letadel z reálného provozu. Jak je uvedeno v tabulce 11, tak v obou sadách dat, ať už v sezónních nebo mimosezónních datech, dosahuje podíl letadel kategorie C nadpoloviční většiny. V obou případech je to přes 80 %.



Pro kapacitu dráhového systému je to naprosto zásadní. Pokud by došlo ke zvýšení podílu letadel z kategorií D a E, muselo by dojít k zajištění většího rozestupu jak na odletu, tak i na příletu. V případě většího podílu všech ostatních kategorií a snížení podílu kategorie C by se snížení kapacity projevilo ještě více, jelikož by častěji docházelo k možnému scénáři, kdy by velmi malé letadlo kategorie A, které patří současně do kategorie L podle turbulence v úplavu, přistávalo za těžkým letadlem například kategorie E (ICAO) a H (podle turbulence v úplavu). V takovém případě by musela být zajištěna separace 6 námořních mil podle tabulky 6, což je dvojnásobek ve srovnání nutné separace mezi dvěma letadly kategorie C, kdy separace z důvodu turbulence v úplavu zajišťována není. V provozních scénářích v kapitolách 6.1. a 6.2., kdy se simulovaly pouze přílety a pouze odlety, bylo pozorováno zásadní snížení výsledné kapacity dráhového systému v momentě, kdy na vstupu došlo k použití rovnoměrného rozložení kategorií letadel ve srovnání s reálným rozložením. Rozdíl v kapacitě byl v obou případech zhruba 10 pohybů za hodinu.

Program Anylogic je komplexním simulačním nástrojem. Jeho výhodou je možnost napojení modelu na ostatní vytvořené modely a zároveň je výhodou i jeho možný rozvoj. V tomto programu je možné simulovat spoustu dalších možných scénářů, které například v reálném provozu ani nenastanou. V takovém případě je potřeba opět počítat s absencí validace modelu.

V průběhu simulace definovaných provozních scénářů v kapitole 6 vyplynuly náměty do budoucna na další možné simulační scénáře. Z pohledu celkové kapacity letiště může být přínosné zvážit situaci, kdy by došlo k současnému použití dráhy 06/24 a 12/30. Dle získaných poznatků se očekává, že celková kapacita by měla dosahovat maxima v případě, kdy by se hlavní dráha, konkrétně dráha 24, jelikož právě ta disponuje vyšší hodinovou kapacitou než dráha 06 v opačném směru, používala primárně pro přílety a v případě nutnosti by bylo možné vložit i požadovaný odlet. A současně by došlo k používání dráhy 12 pouze pro odlety. V tomto směru by došlo k používání části dráhy, která nezasahuje do profilu hlavní dráhy tak, aby bylo možné používat obě dráhy nezávisle. V současné chvíli by však pro takový scénář musel být model upraven tak, aby došlo k zavedení pravidel pro používání obou drah současně. Následně zůstává otázkou, zda existuje možnost nezávislého provozu na obou drahách z hlediska legislativy. Negativním dopadem v případě tohoto scénáře je hlukové zatížení obydlených oblastí za dráhou 12. Provoz právě na vedlejší dráze 12/30 má i z důvodu hlukové zátěže svá omezení, která byla rozebrána v kapitole 3.1.3.

Další limitací simulace je kapacita pojezdového systému. V této práci je řešena kapacita dráhového systému. Výsledky těchto simulací jsou shrnuty na konci kapitoly 6 jako maximální počet pohybů za hodinu. Otázkou však je, zda by takovýto objem provozu pojmul i pojezdový



system. Při simulaci maximální kapacity dráhového systému je uvažováno okamžité najíždění letadel na dráhu. V takovém případě ale nemusí být zajištěno, že pojezdový systém dokáže spolehlivě zajistit požadovanou propustnost. Řešením by mělo být spojení aktuálního modelu s modely, které se zabývaly problematikou pojezdového systému. Výsledkem pak bude vznik vymodelovaného prostředí celého letiště Praha. Model, který byl vytvořen pro potřeby této diplomové práce, by pak následně měl být vstupním a výstupním segmentem v rámci celého modelu.

Jak již bylo zmíněno, tak hlavní výhodou je možný další rozvoj aktuálního modelu. V případě, kdy by existovala potřeba určit kapacitu dráhového systému včetně plánované paralelní dráhy 06R/24L, tak je v současném modelu možnost doplnit chybějící infrastrukturu do modelu. Pokud bude provoz na paralelních drahách nezávislý, tak doplnění infrastruktury je jedinou potřebnou činností, jelikož vše ostatní včetně chování letadel na dráze, separace, logika odletů a příletů je možné použít z aktuálního modelu. Náročnější pak je případ, kdy by provoz na paralelních drahách byl závislý. V tom případě bude nutné doplnit pravidla pro současný provoz na obou drahách.



8. Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvořit simulační model stávajícího dráhového systému a ohodnotit jeho propustnost. Prvním krokem před začátkem tvorby modelu bylo provedení analýzy současného stavu dráhového systému. Tato analýza je zpracována v kapitole 2 této práce. Jsou zde detailně popsány provozní plochy letiště se zaměřením na dráhový systém. Kromě provozních ploch byly popsány i různé druhy přístrojového přiblížení, což je naopak důležité pro pohyb letadla ve vzduchu. Prostor je věnován i popsaní potřebných délek pro přistání.

Další částí vypracování diplomové práce bylo určení parametrů a procesů, které mají dopad na propustnost dráhového systému. Této části byla věnována třetí kapitola. V této kapitole byly rozebrány faktory provozu letiště Praha. Zejména se jednalo o preferenční systém používání drah, postupy pro omezení hluku a další podkapitoly. Dále byl prostor věnován Procesům řízení letového provozu, kdy tím nejzásadnějším pro tvorbu modelu bylo zajišťování separací mezi letadly. Svoji roli v propustnosti dráhového systému hraje i počasí. V poslední podkapitole byly řešeny faktory samotného letadla ve smyslu pohybu letadla na zemi nebo ve vzduchu. Jednalo se o hmotnost letadla, popsaní kategorií letadel a nakonec popsaní procesů a parametrů, které přímo ovlivňují vzlet a přistání.

Ve čtvrté kapitole byla diskutována analýza současného stavu z pohledu využitelnosti softwarové simulace ať už v letectví nebo jiných odvětví. Byly představeny výzkumy, které se zabývaly využitelností simulace pro daný konkrétní účel. Tato kapitola měla za cíl čtenáři představit různé úhly pohledu na využitelnost a přínos počítačové simulace.

V rámci pokynů pro zpracování diplomové práce byla dalším bodem tvorba simulačního modelu provozu letadel na definované infrastruktuře, a tedy na infrastruktuře letiště Praha. Tomuto bodu se věnovala kapitola 5. Zde došlo k představení konkrétní simulační platformy, kterou byl Anylogic. Dále zde byl rozepsán proces tvorby modelu, včetně grafické i logické části modelu.

Součástí páté kapitoly je popis využití dat z reálného provozu, která byla poskytnuta letištěm Praha. Z těchto dat byla vytvořena statistika, což byl jeden ze zdrojů pro vytvoření simulačních scénářů.

Kapitola 6 obsahuje validaci dat a simulaci definovaných scénářů. V rámci simulační analýzy bylo definováno pět provozních scénářů. Jednalo se o scénáře zahrnující pouze přílety na dráhu 24, pouze odlety na dráhu 24, kombinovaný provoz příletů a odletů v poměru 1:1 na dráhu 24, kombinovaný provoz příletů a odletů v poměru na dráhu 06 a na konec kombinovaný provoz na dráhu 24, kde na vstupu byla statistika založená na analýze dat z reálného provozu



letišť Praha. Simulace provozních scénářů měla za cíl potvrdit správné nastavení vytvořeného modelu pro účely simulace. To se v případě příletů povedlo prokázat lépe než v případě odletů. Důvodem byla lepší dostupnost dat z reálného provozu pro přílety ve srovnání s daty pro odlet. V rámci těchto simulačních scénářů byla tímto provedena i validace modelu.

Výsledkem práce je tedy zhodnocení propustnosti dráhového systému na letišti v Praze tak, jak bylo uvedeno v zadání práce. Současně s tímto hlavním cílem diplomové práce vznikl i model, který může sloužit i pro další simulace a může být dále rozvíjen.

Posledním pokynem pro vypracování práce bylo diskutování výsledků simulace z pohledu letištního provozu. Zmíněným problémem se zabývala taktéž kapitola číslo 6, kde výsledky simulací provozních scénářů byly přehledně sepsány na jejím konci.

Poté následovala kapitola s pořadovým číslem 7, kde byly diskutovány výsledky práce spolu s limitacemi práce. Dále bylo poukázáno také na možný další rozvoj simulačního modelu.



Seznam použité literatury

- [1] *AIRPORT CAPACITY ASSESSMENT METHODOLOGY (ACAM Manual)*. EUROCONTROL, 22/11/2016 (edice 1.1), 69 stran. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/publication/airport-capacity-assessment-methodology-acam-manual>
- [2] *Airport Capacity: Guidance on Airport Capacity Declarations*. Airports Council International, 2023 (1. vydání), 38 stran. Dostupné z: <https://www.aci-europe.org/downloads/publications/ACI%20Guidance%20on%20Airport%20Capacity%20Declarations.pdf>
- [3] *AIP - Letecká informační příručka. ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU*. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/control/aip_obsah_cz.htm
- [4] *Letecký předpis L 14 - Letiště*. MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY, 2022. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/index.htm>
- [5] VOSECKÝ, Slavomír. *Radionavigace (062 00 00 00): učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-807-2047-642.
- [6] *Letecký předpis L 6 - Provoz Letadel, Část I*. MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY, 2022. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-6i/data/print/L-6-I_cely.pdf
- [7] *Letecký předpis L 4444 - Postupy pro letové navigační služby*. MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY, 2022. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/index.htm>
- [8] *SKYbrary - aquaplaning*. Dostupné z: <https://skybrary.aero/articles/aquaplaning>
- [9] *EASA Seminar - Reporting of Runway Conditions Relevant to Aeroplane Performance*. EASA, AIRBUS. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/downloads/125409/en>
- [10] *Letecký předpis L 8168 - Letové postupy, Část I*. MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY, 2022. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/index.htm>



- [11] CHEN, X; LI, J-h a GAO, Q. A simple process simulation model for strategic planning on the airside of an airport: a case study. *Journal of Simulation*. 2017, roč. 9, č. 1, s. 64-72. ISSN 1747-7778. Dostupné z: <https://doi.org/10.1057/jos.2014.20>.
- [12] RAY, Cyril a CLARAMUNT, Christophe. A distributed system for the simulation of people flows in an airport terminal. *Knowledge-Based Systems*. 2003, roč. 16, č. 4, s. 191-203. ISSN 09507051. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0950-7051\(03\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0950-7051(03)00013-3).
- [13] FONSECA I CASAS, P.; CASANOVAS, J. a FERRAN, X. Passenger flow simulation in a hub airport: An application to the Barcelona International Airport. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2014, roč. 44, s. 78-94. ISSN 1569190X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.03.008>.
- [14] TEE, Y. Y. a ZHONG, Z. W. Modelling and simulation studies of the runway capacity of Changi Airport. *The Aeronautical Journal*. 2018, roč. 122, č. 1253, s. 1022-1037. ISSN 0001-9240. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/aer.2018.48>.
- [15] SUIKAT, Reiner; KALTENHÄUSER, Sven; HAMPE, Jens; TIMMERMANN, Felix a WEBER, Bernhard. ACCES - A Gaming and Simulation Platform for Advanced Airport Operations Concepts. In: *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010, -. ISBN 978-1-62410-152-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.2514/6.2010-7610>.
- [16] *AnyLogic - Use of Simulation*. Dostupné z: <https://www.anylogic.com/use-of-simulation/>
- [17] AnyLogic in three days. 6. edice. 2023. Dostupné z: <https://www.anylogic.com/upload/al-in-3-days/anylogic-in-3-days.pdf>
- [18] HAD, Petr. *HODNOCENÍ PROPUSTNOSTI LETIŠTNÍ INFRASTRUKTURY A ZPŮSOBENÝCH ZPOŽDĚNÍ LETADEL*. Praha, 2021. Diplomová práce. České vysoké učení technické - fakulta dopravní.
- [19] SLISCHKA, Martin. *VLIV APLIKACE SNÍŽENÉHO MINIMA ROZSTUPU NA TRATI KONEČNÉHO PŘÍBLÍŽENÍ NA LKPR*. Praha, 2023. Bakalářská práce. České vysoké učení technické - fakulta dopravní.

Seznam obrázků

Obrázek 1 *Infrastruktura Letiště Praha.* [3]

Obrázek 2 *Přiblížení NDB se 2 majáky na letiště Kunovice (LKKU).* [3]

Obrázek 3 *VOR přiblížení na dráhu 30 na LKPR.* [3]

Obrázek 4 *Znázornění vyčkávacího místa při LVO.* [3]

Obrázek 5 *Schéma aktuálního modelu.*

Obrázek 6 *Bloková sekvence pro změnu dráhy v agentu Runway.*

Obrázek 7 *Grafické zpracování letištní infrastruktury pro účel hodnocení propustnosti dráhového systému na letišti v Praze (PRG/LKPR).* [3] (upraveno autorem)

Obrázek 8 *Schéma funkce pro přilet letadla.*

Obrázek 9 *Schéma dynamické události pro přilet letadla.*

Obrázek 10 *Schéma pro vstup letadla na dráhu.*

Obrázek 11 *Vývojový diagram logické modelu.*

Obrázek 12 *Zprůměrovaný týdenní provoz na letišti Praha.*

Obrázek 13 *Zprůměrovaný provoz získaný z 5 simulací.*

Obrázek 14 *Porovnání průměru reálných a simulačních dat na odletu.*

Obrázek 15 *Porovnání průměru reálných a simulačních dat na příletu.*



Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry všech RWY na LKPR.

Tabulka 2 Vyhlášené délky drah na LKPR.

Tabulka 3 TWY pro výjezd z RWY.

Tabulka 4 TWY pro uvolnění RWY při HIRO.

Tabulka 5 TWY pro vstup na RWY při HIRO.

Tabulka 6 Separace mezi letadly z důvodu turbulence v úplavu.

Tabulka 7 Tabulka pro RWYCC.

Tabulka 8 Kategorie letadel podle rychlosti nad prahem dráhy.

Tabulka 9 Kategorie letadel podle rozpětí křídel.

Tabulka 10 Kategorie letadel podle rozpětí křídel.

Tabulka 11 Skladba týdenního provozu na letišti Praha.

Tabulka 12 Čas strávený na dráze pro březnová data.

Tabulka 13 Čas strávený na dráze pro srpnová data.

Tabulka 14 Pojezdové dráhy pro uvolnění a najetí na dráhu pro březnová data.

Tabulka 15 Pojezdové dráhy pro uvolnění a najetí na dráhu pro srpnová data.

Tabulka 16 Výsledky simulace příletů na dráhu 24 na LKPR.

Tabulka 17 Výsledky simulace odletů na dráhu 24 na LKPR.

Tabulka 18 Výsledky simulace kombinace příletů a odletů na dráhu 24 na LKPR.

Tabulka 19 Výsledky simulace kombinace příletů a odletů na dráhu 06 na LKPR.

Tabulka 20 Čas strávený na dráze pro jednotlivé kategorie letadel v pátém simulačním scénáři.

Tabulka 21 Pojezdové dráhy pro uvolnění a najetí na dráhu během simulace.