

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Radek Gadas

**HODNOCENÍ MOŽNOSTI NAVÝŠENÍ  
PROPUSTNOSTI RWY 30 NA LKPR**

Diplomová práce

**2023**

**K621.....Ústav letecké dopravy**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Radek Gadas**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

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

Název tématu (česky): **Hodnocení možnosti navýšení propustnosti RWY 30 na LKPR**

Název tématu (anglicky): Evaluation of the Potential for RWY 30 Throughput Increase at LKPR

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem diplomové práce je ohodnotit možnost zvýšení propustnosti dráhy 30 na Letišti Václava Havla Praha.
- Provedte analýzu současné konfigurace, provozu a kapacity RWY 30 na LKPR.
- Navrhněte možnost navýšení propustnosti RWY 30.
- Vytvořte simulační model navrhovaného řešení.
- Pomocí simulací ohodnoťte dopady návrhu.
- Výsledky simulace diskutujte a stanovte závěry.



- 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: EASA, CS-ADR-DSN – Certifikační specifikace a poradenský materiál pro návrh letišť  
Wolfgang Kuhn, Handbook of digital enterprise systems: digital twins, simulation and AI, 2019  
Fei Tao, et al, Digital Twin Driven Smart Design, Academic Press 2020

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

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

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Radek Gadas  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 16. května 2023

## Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem společnostem, které mi ochotně poskytly podklady a data pro vypracování diplomové práce. Velké poděkování patří týmu Letiště Praha, za možnost odborných konzultací jak postupu, tak výsledků práce. Poděkování také patří panu Ing. Slobodanu Stojíčkovi, Ph.D. za pravidelné konzultování a vedení diplomové práce.

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze dne 7. listopadu 2023



Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

## HODNOCENÍ MOŽNOSTI NAVÝŠENÍ PROPUSTNOSTI RWY 30 NA LKPR

diplomová práce

listopad 2023

Bc. Radek Gadas

### **ABSTRAKT**

Propustnost vzletové a přistávací dráhy je jedním z klíčových prvků při hodnocení kapacity letiště. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících dráhovou propustnost je infrastruktura výjezdů z dráhy. Diplomová práce se podrobněji zabývá dráhou 30 na Letišti Václava Havla Praha. Zkoumá možnost, jak dráhovou propustnost navýšit, a to za pomoci výstavby nového výjezdu pro rychlé odbočení. Předmětem práce je zvolit optimální pozici nového výjezdu. Výzkum je proveden pomocí simulačního modelu REDIM. Výstupem práce je návrh konkrétního řešení výjezdu a ohodnocení jeho vlivu na propustnost dráhy 30.

### **KLÍČOVÁ SLOVA**

Letiště Václava Havla Praha, propustnost dráhy, ROTA, simulační model REDIM, výjezd pro rychlé odbočení

### **ABSTRACT**

The throughput of a runway is one of the key elements in assessing airport capacity. One of the main factors affecting runway throughput is the infrastructure of the runway exits. Master's thesis focuses on runway 30 at Václav Havel Airport Prague, examining the possibility of increasing its throughput by constructing a new rapid exit taxiway. The aim of the thesis is to select the optimal position for the new exit. The research is conducted using the simulation model REDIM. The output of the thesis is a proposal for a specific solution for the exit and its impact on the throughput of RWY 30.

### **KEY WORDS**

Václav Havel Airport Prague, runway throughput, ROTA, simulation model REDIM, rapid exit taxiway

# Obsah

Seznam použitých zkratk	7
1 Úvod	9
2 Propustnost dráhy	11
2.1 Definice propustnosti RWY	11
2.1.1 Runway occupancy time	11
2.2 Faktory ovlivňující dráhovou propustnost a přistání	12
2.2.1 Nadmořská výška letiště	13
2.2.2 Sklon dráhy	13
2.2.3 Meteorologické podmínky	13
2.2.4 Skladba provozu	14
2.2.5 Chování posádek	15
2.2.6 Rozstupy letadel při přistání	15
2.2.7 Počet, umístění a tvar výjezdů z dráhy	17
2.2.8 RET a přístupy k jeho návrhu	18
3 Letiště Václava Havla Praha	21
3.1 Základní informace	21
3.2 Označení letiště	21
3.3 Současná infrastruktura letiště	22
3.3.1 Terminály	22
3.3.2 Dráhový a pojezdový systém	22
3.3.3 RWY 30 a přilehlé pojezdové dráhy	23
3.4 Rozvoj LKPR	26
3.4.1 Nový výjezd z RWY 24	26
3.4.2 Dlouhodobý rozvoj a výstavba paralelní dráhy	27
3.4.3 Centrální odmrazovací stání a úprava TWY	28
4 Provoz na LKPR	29
4.1 Popis řízení provozu na LKPR	29
4.1.1 Koordinace provozu	29

4.1.2	Provoz kritických typů letadel.....	29
4.1.3	Volba RWY v užívání.....	30
4.1.4	HIRO procedury.....	31
4.1.5	Propustnost drah.....	31
4.2	Analýza provozu na LKPR.....	32
4.2.1	Statistika využití drah.....	32
4.2.2	Výkony na RWY 30.....	33
4.2.3	Skladba provozu na RWY.....	34
4.2.4	Rozdělení provozu MEDIUM JET dle výjezdů.....	35
4.2.5	Statistika ROTA pro RWY 30.....	36
4.3	Závěr a stanovení dalšího postupu.....	36
5	Simulační model REDIM.....	37
5.1	Základní popis.....	37
5.2	Popis fungování modelu.....	37
5.3	Motivační faktor.....	39
6	Nastavení simulace.....	40
6.1	Letištní parametry.....	40
6.2	Meteorologické parametry.....	41
6.3	Provozní parametry.....	42
7	Validace simulačního modelu.....	44
7.1	Postup validace a referenčních data.....	44
7.2	Validace ROTA na TWY G.....	44
7.2.1	Volba validačního nástroje a popis validace.....	45
7.2.2	Výběr statistických testů.....	46
7.2.3	Referenční data.....	47
7.2.4	Data ze simulace.....	48
7.2.5	Výsledky validace ROTA na TWY G.....	48
7.2.6	Závěr validace ROTA na TWY G.....	49
7.3	Validace využití výjezdů.....	49

7.3.1	Referenční data .....	50
7.3.2	Simulace.....	50
7.3.3	Validace a výsledek.....	50
7.4	Validace celkové průměrné doby ROTA.....	51
7.5	Závěr validace .....	51
8	Návrh RET.....	52
8.1	Tvar RET.....	52
8.1.1	Rozměry pojezdové dráhy .....	52
8.1.2	Geometrie výjezdu .....	54
8.2	Požadavky při návrhu pozice RET.....	55
8.3	Varianta č. 1 .....	56
8.3.1	Zakreslení varianty č. 1 .....	56
8.3.2	Chování provozu .....	57
8.3.3	Změna motivačního faktoru .....	57
8.3.4	Distribuce provozu ve variantě č. 1.....	59
8.3.5	Porovnání ROTA .....	60
8.4	Varianta č. 2 .....	61
8.4.1	Zakreslení varianty č. 2 .....	61
8.4.2	Chování provozu .....	61
8.5	Shrnutí a vyhodnocení variant.....	63
8.6	Vliv RET na propustnost RWY 30 .....	64
8.6.1	Výpočet navýšení propustnosti .....	64
9	Diskuze .....	65
10	Závěr.....	66
	Seznam použité literatury .....	68
	Seznam obrázků.....	71
	Seznam tabulek.....	72
	Seznam příloh .....	72



## Seznam použitých zkratk

ZKRATKA	ANGLICKÝ VÝZNAM	ČESKÝ VÝZNAM
AIP	Aeronautical Information Publication	Letecká informační příručka
ASDE-X	Airport Surface Detection Equipment Model-X	Letištní zařízení pro detekci kolizí – Model X
COS	Central De-icing Stands	Centrální odmrazovací stání
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety Air Navigation	Evropské organizaci pro bezpečnost letového Provozu
FT	Feet	Stopa
HIRO	High Intensity Runway Operations	Postupy pro vyšší intenzitu provozu na dráze
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní asociace leteckých dopravců
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
JET	Aircraft powered by turbine	Letadla poháněná Turbínou
KG	Kilograms	Kilogramy
KM	Kilometers	Kilometry
KT	Knots	Uzly
LDA	Landing Distance Available	Použitelná délka přistání
LKPR	ICAO code of Prague airport	Letiště Václava Havla Praha (označení dle ICAO)
LVP	Low Visibility Procedures	Postupy za nízké dohlednosti
M	Meters	Metry
METAR	Meteorological Aerodrome Report	Pravidelná letištní zpráva o počasí

<b>ZKRATKA</b>	<b>ANGLICKÝ VÝZNAM</b>	<b>ČESKÝ VÝZNAM</b>
MTOW	Maximum Takeoff Weight	Maximální vzletová hmotnost
NM	Nautical miles	Námořní míle
PC	Point of curvature	Bod zakřivení
PRG	IATA code of Prague airport	Letiště Václava Havla Praha (označení dle IATA)
PROP	Aircraft powered by propeller	Letadla poháněná vrtulí
REDIM	Runway Exit Design Interactive Model	Interaktivní model pro návrh výjezdu z dráhy
RET	Rapid Exit Taxiway	Pojezdová dráha pro rychlé odbočení
ROT	Runway Occupancy Time	Čas obsazení dráhy letadlem
ROTA	Runway Occupancy Time of arrival	Čas obsazení dráhy letadlem při přistání
ROTD	Runway Occupancy Time of Departure	Čas obsazení dráhy letadlem při vzletu
RWY	Runway	Vzletová a přistávací dráha
ŘLP	Air Navigation Services of the Czech republic	Řízení letového provozu České republiky, s. p.
TWY	Taxiway	Pojezdová dráha
WTC	Wake Turbulence Category	Kategorie turbulence v úplavu

# 1 Úvod

Letecká doprava zaznamenala v posledních letech stále se zvyšující počet letů. Je to dáno jednak rozvojem leteckého průmyslu, který umožnil například propojení nových destinací, tak také snížením cen letenek u některých společností. Růst poptávky je znát na všech subjektech zajišťujících fungování systému letecké dopravy a Letiště Václava Havla Praha není jakožto hlavní letecký uzel v České republice výjimkou.

Klíčovou součástí letištní infrastruktury je vzletová a přistávací dráha, též označovaná zkratkou RWY. Je to právě runway, která tvoří páteřní část celého letištního systému a bývá často limitujícím prvkem z hlediska maximální propustnosti provozu. Propustností rozumíme počet pohybů letadel neboli počet provedených vzletů či přistání za jednotku času, která bývá nejčastěji vyjádřena jednou hodinou.

Letiště Praha v současné době disponuje dvěma vzletovými a přistávacími drahami. Dráhou hlavní označenou RWY 06/24 a dráhou vedlejší dráhou 12/30. Primárně letiště používá k odbavení provozu dráhu hlavní, nicméně v provozu mohou nastat situace, kdy její použití není možné. Příkladem mohou být například nevyhovující meteorologické podmínky či uzavírka hlavní dráhy z důvodu její pravidelné údržby. I za těchto situací však musí být letiště schopné odbavit plnohodnotný provoz, který nepřekračuje kapacitní limity. Diplomová práce se podrobně zabývá dráhou vedlejší, konkrétně přílety ve směru dráhy 30 a možnostmi, jak hodinovou propustnost dráhy navýšit.

Propustnost dráhy je ovlivněna řadou faktorů, které jsou postupně rozebrány v teoretické části práce. Jedním z klíčových faktorů je rozmístění a tvar výjezdů z dráhy. Jejich vhodnou pozicí a vhodným tvarem lze zajistit, aby letadla strávila na dráze po přistání co možná nejkratší dobu, a uvolnila tak runway dalšímu provozu. To umožňuje zlepšit plynulost provozu a navýšit tak propustnost dráhy. Současné rozmístění výjezdů z dráhy 30 je z pohledu maximální propustnosti dráhy neefektivní. Jedním z nejúčinnějších nástrojů na zlepšení je výstavba tzv. výjezdu pro rychlé odbočení. Ten umožní letounům uvolnit dráhu při vyšší rychlosti, čímž lze zkrátit celkový čas strávený na dráze, což má pozitivní dopad na zvýšení dráhové propustnosti. Předmětem diplomové práce je návrh právě takového výjezdu z dráhy 30. Chování letadel při přistání je však velice komplexní záležitostí, vstupuje do něj řada vlivů a nelze jej tak vyjádřit pouze jednoduchým vzorcem či rovnicí. Proto je nutné pro návrh pozice výjezdu zvolit adekvátní nástroj, který zohledňuje většinu proměnlivých faktorů, jež mají zásadní vliv na průběh přistání letadla.

Pro účely diplomové práce byl použit nástroj vyvinutý americkou univerzitou Virginia Polytechnic Institute and State University. Jedná se o matematický model s názvem REDIM - Runway Exit Design Interactive Model. Model byl vytvořený pro simulaci chování letounů na dráze po přistání a pro návrh pozice výjezdu pro rychlé odbočení z dráhy.

Z podrobné analýzy dat od Letiště Praha a Řízení letového provozu České republiky byly zjištěny parametry současného provozu a charakteristika chování letadel na dráze 30. Získaná a vyhodnocená data byla následně použita jako referenční hodnoty. Data z reálného provozu byla také použita k nastavení správného chování letadel v simulaci, aby mohl být simulační model následně validován.

Cílem práce je vyhotovit konkrétní návrh řešení nového výjezdu pro rychlé odbočení z dráhy 30, které povede k navýšení její propustnosti. Návrh by měl zohlednit jak požadavky ze strany Letiště Praha, tak požadavky ze strany předpisu pro návrh takového výjezdu. Výstupem práce je zakreslení výjezdu do letištní infrastruktury, jeho vyhodnocení a popis jeho vlivu na propustnost dráhy.

## 2 Propustnost dráhy

Jelikož se práce zabývá možnostmi zvýšení dráhové propustnosti, tak je nutné si nejprve tento pojem definovat a popsat jaké faktory do něj vstupují. V této kapitole jsou blíže popsány jednotlivé proměnné, které ji ovlivňují a na čem tedy propustnost závisí.

### 2.1 Definice propustnosti RWY

Správné pochopení propustnosti je klíčovou částí při jejím dalším zkoumání. V leteckých publikacích bychom našli více variant definic. Na základě studie několika dokumentů byla vybrána definice od Mezinárodní organizace pro civilní letectví ICAO:

Ta definuje propustnost jako maximální možný počet vzletů či přistání, které je možné na dráze při dodržení specifických podmínek provést za určitý čas. [1]

Nejčastěji bývá propustnost vyjádřena za jednu hodinu.

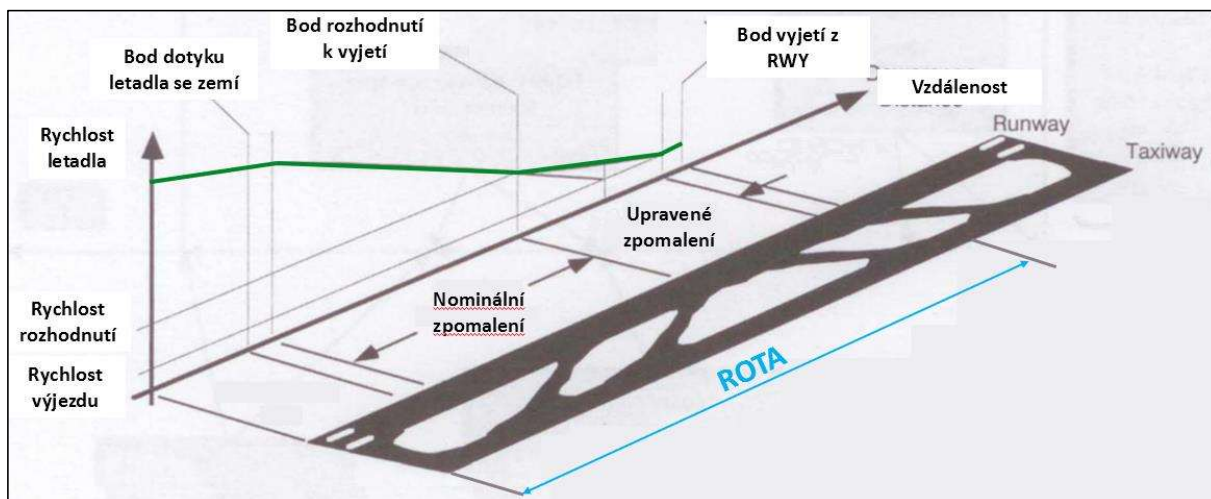
Jednou z klíčových veličin pro stanovení dráhové propustnosti je doba, kterou letadla stráví na vzletové a přistávací dráze. Zredukováním doby lze docílit pozitivních přínosů na propustnost a tím zefektivnit plynulost provozu. V letecké terminologii je čas označován jako Runway occupancy time. [2] [3]

#### 2.1.1 Runway occupancy time

Tento časový údaj je stěžejním parametrem při hodnocení dráhové propustnosti, a proto je nutné se blíže seznámit s jeho definicí i způsobem měření. Jedná se tedy o tzv. Runway occupancy time neboli zkratkou značený ROT. Rozlišujeme dva druhy času ROT. [2]

U vzletu se doba značí zkratkou ROTD – Runway occupancy time of departure. Počítá se od vstupu letounu na dráhu (dále také RWY), až po okamžik, kdy letoun přeletí opačný práh dráhy. [2]

V případě přistání se jedná o čas označený zkratkou ROTA – Runway occupancy time of arrival. Diplomová práce se blíže zabývá přistávajícím provozem, proto je pojem ROTA popsán podrobněji. Obecně je tento čas měřen od momentu, kdy letadlo přeletí práh dráhy, čímž vstoupí do jejího prostoru. Měření se ukončí, jakmile letadlo vyjede z RWY a je svým celým objemem mimo dráhu. Dráhou je myšlen obrazec určený šířkou a délkou dráhy. Grafické vysvětlení měření času ROTA je zobrazeno na obrázku č. 1 na další straně. Přistání letadla se skládá z několika částí. V každé z nich má letoun specifickou konfiguraci a jeho rychlost je ovlivněná řadou faktorů. I výsledný čas ROTA lze podle fáze přistání rozdělit do několika dílčích částí. [2] [3]



Obrázek 1: Průběh přistání letadla (vytvořeno pomocí [2])

Na obrázku jsou vidět jednotlivé úseky přistání, ze kterých se celková doba ROTA skládá a také přibližný průběh rychlostního profilu letadla při přistání. Pro přeletění prahu dráhy letoun pokračuje v letové fázi až do bodu dotyku se zemí. Ten není dán pouze jedním bodem, protože letoun dosedá nejprve na hlavní podvozek a až po chvíli na předový. Jakmile je letoun na dráze začíná fáze tzv. nominální decelerace. Jsou zde uplatněny všechny prostředky sloužící ke zpomalení letounu. Jedná se o zpětný tah motorů, vysunutí spoilerů a také brždění samotného podvozku letadla. V této fázi letoun pokračuje až do bodu, kde začíná tzv. *adjusted deceleration*, neboli upravené zpomalení. Zde posádka upravuje rychlost cíleně tak, aby zajistila plynulé, ale hlavně bezpečné vyjetí z dráhy pomocí jednoho z výjezdů. Jakmile je letoun celým svým objemem mimo prostor dráhy, je ukončeno měření času ROTA a letoun dále pokračuje v pojíždění až na svoji stojánku. [2] [3] [6]

## 2.2 Faktory ovlivňující dráhovou propustnost a přistání

Runway bývá často nejslabším článkem z pohledu celkové maximální propustnosti letiště, a může tak určit horní limit celého systému. Komplexnost této problematiky spolu nese řadu faktorů, které ovlivňují dráhovou propustnost. Ta nemusí být v čase konstantní. Může se lišit v závislosti na fyzikálních či provozních podmínkách v průběhu roku. [3] [4]

Jelikož diplomová práce blíže zkoumá přílety letadel, jsou zde rozebrány také faktory mající dopad na přistání. Většina z nich má rovněž vliv na rychlostní profil letadla, což přímo souvisí s dobou ROTA, která je hlavním parametrem při hodnocení dráhové propustnosti. Pokud chceme popsat možnost, jakou lze propustnost navýšit, je nejprve nutné blíže určit faktory, které ji ovlivňují. [3] [4]

Jedná se o tyto faktory, které jsou následně blíže popsány:

- Nadmořská výška letiště
- Sklon dráhy
- Meteorologické podmínky
- Skladba provozu
- Chování posádek
- Rozstupy letadel při přistání
- Počet, umístění a tvar výjezdů z dráhy [3] [4] [5]

### **2.2.1 Nadmořská výška letiště**

Poloha letiště ovlivňuje výkonnost letadel kvůli změně hustoty vzduchu s výškou. Čím výše je letiště položené, tím menší hustota vzduchu se na něm nachází. Letadla tak musí letět na vyšší rychlosti pro dosažení dostatečné hodnoty vztlaku. To ovlivňuje jejich vstupní rychlost při přistání a tím i průběh zpomalení letadla. [6]

### **2.2.2 Sklon dráhy**

Podélný sklon dráhy má zásadní vliv na deceleraci letounu při přistání. V případě dráhy z kopce dochází k negativnímu ovlivnění zpomalení letadel. Posádka tak musí brzdit více, aby zastavila na stejné vzdálenosti, než by tomu bylo u rovné vzletové a přistávací dráhy. Naopak dráha s pozitivním sklonem pomáhá letounu při jeho zpomalení. Maximální hodnoty podélného sklonu dráhy jsou definovány v předpisu L14. [6] [12]

### **2.2.3 Meteorologické podmínky**

Letový provoz je závislý na počasí a jeho vlivech na bezpečnost a výkonnost letounů. Meteorologické podmínky mají významný vliv na přilétávající i odlétávající provoz a mají tak přímý dopad na aktuální propustnost dráhy. [4]

Mezi nejvýznačnější vlivy řadíme:

#### **Teplota**

Teplota má vliv na rychlost letounu. Se vzrůstající teplotou dochází k rozpínání vzduchu, čímž klesá jeho hustota. Pokles hustoty znamená, že letadlo musí letět na vyšší rychlosti pro zachování stejné hodnoty vztlaku. Při přistání se letadlo pohybuje na vyšší přistávací rychlosti, tím se prodlužuje jeho brzdná dráha a je tak ovlivněn jeho průběh zpomalení na RWY. Při vzletu musí letadlo dosáhnout vyšší rychlosti pro odpoutání, tím se prodlužuje rozjezd po zemi i doba ROTD. [4] [6]

## **Směr a síla větru**

Směr proudění, tedy odkud vítr vane určuje dráhu v používání. To vyplývá z potřeby letounů provést vzlet i přistání proti větru. Dále směr větru ovlivňuje výkonnost letounů jak při vzletu, tak při přistání, což má přímý dopad na propustnost vzletové a přistávací dráhy. Náhlá změna směru větru či jeho síly může mít za následek například zvýšení přistávací rychlosti letadla. To vede k prodloužení brzdné vzdálenosti na zemi, která je úzce spojená s dobou strávenou na dráze. [4] [6]

## **Oblačnost a viditelnost**

Kombinace výšky základny oblačnosti nad zemí a dohlednosti má vliv na provoz. Výrazně zhoršené meteorologické podmínky mohou posádkám omezit výhled z kabiny. Při přistání tak nemusí mít dobré situační povědomí o jejich vzdálenosti k dalšímu výjezdu, což může ovlivnit průběh zpomalení na dráze. Snížená dohlednost má také vliv na minimální rozstupy letadel při přistání. Pokud řídící letového provozu nemá obě přistávající letadla v dohledu, pak nesmí použít tzv. snížená minima rozstupů, která jsou popsána níže. Pokud navíc klesnou hodnoty dohlednosti a výšky základny oblačnosti pod určitou mez, jsou aplikovány postupy tzv. LVP - Low visibility procedures, tedy procedury za snížené viditelnosti. Ty v sobě zahrnují zvýšení rozstupů letadel při přistání, které je přímým důsledkem snížení aktuální hodinové dráhové propustnosti. [4] [6] [7]

## **Srážky**

Ať už se jedná o déšť, mrholení nebo sníh, všechny tyto druhy srážek se negativně podílejí na stav povrchu RWY. Tím dochází ke snížení tření a zhoršení brzdných účinků, což opět vede k ovlivnění brzdné dráhy a způsobu, jakým letoun zpomaluje. [4] [6]

### **2.2.4 Skladba provozu**

Každý letoun má různý profil decelerace nebo rozdílnou rychlost na přistání, což je třeba při popisu chování letadel na dráze zohlednit. Jedním z největších podílů na dráhovou propustnost má tzv. skladba provozu. Pod tímto pojmem si můžeme jednoduše představit procentuální vyjádření toho, který typ letadel v provozu převládá a který má naopak nižší zastoupení. Vyjádření výskytu jednotlivých letadel v dlouhodobém hledisku je klíčovou částí popisu provozu na letišti. Pro tyto účely bylo využito rozdělení letadel podle velikosti vygenerované turbulence v úplavu. Ta je označována zkratkou WTC – Wake turbulence category a rozeznáváme celkem čtyři druhy. Rozdělení je dáno maximální vzletovou hmotností letadla – značenou MTOW.



Tabulka č. 1 níže uvádí jednotlivé kategorie turbulence v úplavu a k nim odpovídající rozsah maximální vzletové hmotnosti. [4] [7]

Tabulka 1: Kategorie WTC [7]

Kategorie WTC a její označení	Maximální vzletová hmotnost letadla MTOW [kg]
LIGHT – L	méně než 7 000
MEDIUM – M	7 000 - 136 000
HEAVY – H	136 000 a více (kromě typů v kat. SUPER)
SUPER – J	typy letadel určené dokumentem ICAO doc. 8643

Pro účely práce byly letouny rozděleny ještě podle druhého kritéria a tím je druh pohonu. Letadla jsou rozdělena na ty poháněná vrtulí. Z anglického názvu *propeller* jsou označeny zkratkou PROP. Druhým zástupcem jsou pak letouny poháněné turbínou, které jsou označeny zkratkou JET. Nutno zmínit, že kategorie nemá nic společného s motorem samotným. Do kategorie PROP tak může spadat jak malé letadlo poháněné pístovým motorem, tak větší letadlo, jehož vrtule je poháněna proudovým motorem. [6]

### 2.2.5 Chování posádek

Nejobtížněji popsatelným vlivem je chování posádky. Pokud se piloti rozhodnou použít vyšší úroveň decelerace, lidově řečeno více šlápnout na brzdy, pak to má zásadní vliv na křivku zpomalení, a tudíž i na velikost doby ROTA. V některých případech mohou být piloti motivováni použít bližší výjezd například z důvodu zpoždění letu a snahy jeho snížení. Do rozhodování vstupují také požadavky ze strany leteckého dopravce, který se snaží snížit opotřebení brzd a tím zredukovat náklady spojené s údržbou letadel. V každém případě by vždy měla hrát nejdůležitější roli bezpečnost přistání. [4] [5]

### 2.2.6 Rozstupy letadel při přistání

Jedním z hlavních kritérií při posuzování separace dvou letadel přistávajících na stejnou dráhu je jejich kategorie WTC. Pro tu platí hlavní zásada, že pokud je následující provoz v kategorii lehčí než provoz předcházející, pak je nutné aplikovat proceduru WTC rozstupu. Procedura vychází z jednoduché logiky, kdy letadlo lehké kategorie může být z hlediska turbulence v úplavu ohroženo těžší kategorií letadla. Pokud tedy přistává například Cessna C172, jež spadá do kategorie LIGHT, za Boeingem B737, který je z kategorie MEDIUM, pak následující letoun (C172) musí dodržet minimální rozstup pěti námořních mil (NM). Všechny hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 2 dále. [4] [7]

Tabulka 2: Rozstupy letadel na přistání podle WTC [7]

Kategorie WTC následujícího letadla	Kategorie WTC předcházejícího letadla			
	LIGHT	MEDIUM	HEAVY	SUPER
LIGHT		5 NM	6 NM	8 NM
MEDIUM			5 NM	7 NM
HEAVY			4 NM	6 NM
SUPER				

Druh letounu z hlediska turbulence v úplavu je pouze jedním z faktorů ovlivňujících rozstupy letadel na přistání. Svoji roli hrají například vnější podmínky nebo dostupnost přehledových systému pro řízení provozu. Pro další zkoumání v rámci této práce jsou předpokládány podmínky normálního provozu, který není omezen meteorologickými podmínkami ani výpadkem žádného systému podporující řízení provozu. [7] [8]

Minimum radarového rozstupu dvou letadel v TMA PRAHA jsou 3 NM, když není rozstup určen tabulkou WTC separací. Tato hodnota je však z pohledu rozstupů dvou za sebou následujících přistání na dráhu nedostatečná, a tak se používá separace 4 NM. Jedná se o provozem vyzkoušenou hodnotu, která dvěma za sebou přistávajícím letounům zajistí dostatečný rozstup na to, aby první letoun dráhu bezpečně uvolnil, než dojde k přistání letadla druhého. Nutné zmínit, že rozstup 4 NM lze aplikovat pouze za podmínek uvedených výše a v momentě kdy se separace neřídí tabulkou WTC rozstupů. [7] [8]

### **Snížená minima rozstupů**

Stanoviště TWR, které má na starosti mimo jiné řízení příletů v jejich konečné fázi přiblížení a přistání, může hodnotu separace snížit. Hovoříme pak o aplikaci tzv. snížených minimech rozstupů. [7] [8]

Do rozhodovacího procesu, zda je možné tuto proceduru aplikovat, vstupuje mnoho veličin blíže specifikovaných v bodech 5.11, 7.11 a 8.7.3.2 předpisu L4444. [7]

Bod 8.7.3.2 předpisu L4444 uvádí, že hodnotu minimálního podélného rozstupu lze snížit, ne však pod 2,5 NM mezi za sebou letícími letadly usazenými na stejné trati konečného přiblížení ve vzdálenosti do 18,5 km (10 NM) od prahu dráhy. [7]

Snížené minimum rozstupu 4,6 km (2,5 NM) se smí uplatnit za předpokladu, že jsou splněny podmínky i-viii bodu 8.7.3.2 předpisu L4444. Dále jsou zmíněna pouze kritéria relevantní k tématu diplomové práce. [7]

- i) průměrný čas obsazení dráhy přistávajícími letadly je ověřen způsobem, jako jsou údaje o statistickém shromažďování dat, analýzy a metody založené na teoretickém modelování a nepřesahuje 50 sekund
- ii) brzdící účinek je hlášený jako dobrý a časy obsazení dráhy nejsou nepříznivě ovlivněny znečištěním jejího povrchu, jako rozbředlý sníh, sníh nebo led
- iii) letištní řídicí je schopen pozorovat vizuálně nebo prostřednictvím specifických technických prostředků dráhu v používání a k nim připojené vstupy a výstupy pojezdových drah
- iv) neuplatňují se vzdálenostní minima rozstupů podle WTC v ust. 8.7.3.4 níže nebo jak mohou být předepsána příslušným úřadem ATS
- v) přibližovací rychlosti letadel jsou pozorně sledovány řídicím a v případě potřeby upraveny tak, aby se rozstup nesnížil pod minimum
- vi) kdykoliv se uplatňuje snížené minimum rozstupů na konečném přiblížení, provozovatelé letadel a piloti byli upozorněni na nutnost urychleného uvolňování dráhy [7]

Klíčovým bodem, důležitým pro praktickou část diplomové práce, je první z výše vypsanych kritérií. Průměrná doba ROTA by neměla být větší 50 vteřin a její měření by mělo být založené na způsobech jako jsou údaje o statistickém shromažďování dat, analýzy a metody založené na teoretickém modelování provozu. [7]

Požadavkem ze strany Letiště Praha je, aby návrh navýšení propustnosti dráhy 30 neznemožnil případné použití takové procedury. Proto návrh cílí na splnění bodu i) výše, tedy snížit průměrnou dobu strávenou na dráze pod hodnotu 50 sekund. Aplikace snížených minim rozstupů není aktuálním ani primárním cílem letiště. Avšak pokud je již proveden průzkum zvýšení propustnosti dráhy, pak je bráno v potaz, aby případně nebylo v budoucnu použití procedura snížených rozstupů znemožněno. [9]

### **2.2.7 Počet, umístění a tvar výjezdů z dráhy**

Diplomová práce se věnuje přistání letadel na RWY 30 a zkoumá možnost snížení doby ROTA. Vzdálenost výjezdu od prahu dráhy i jeho tvar ovlivňují, při jaké rychlosti letouny vyjíždí z dráhy, což má zásadní vliv na dobu strávenou na dráze. Vhodným tvarem výjezdu z dráhy a jeho vhodným umístěním lze docílit časové úspory doby ROTA, a tak umožnit plynulejší provoz na dráze. [4] [10]

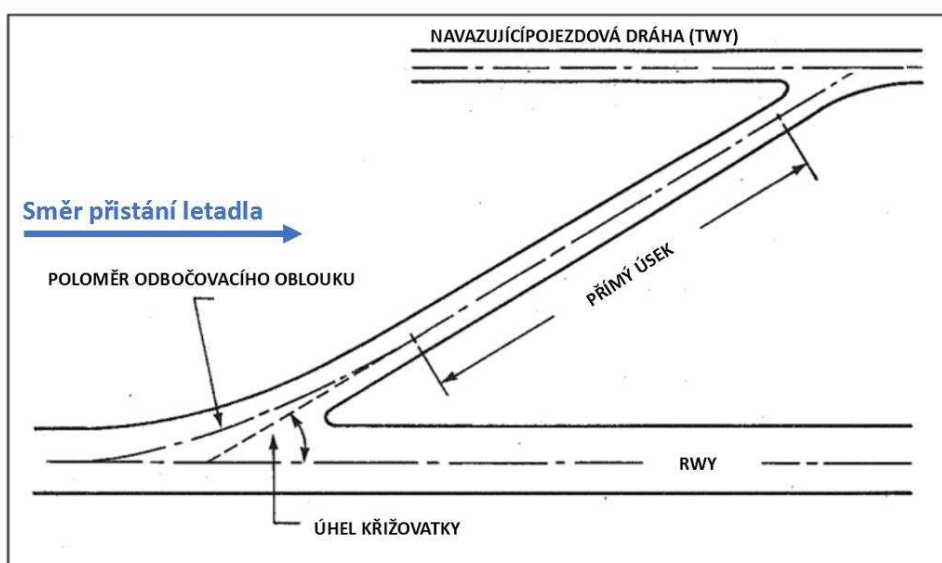
Nejúčinnějším nástrojem pro redukci času ROTA je výstavba tzv. výjezdu pro rychlé odbočení neboli zkratkou značený RET, jež je podrobněji rozebrán v následující části. [10]

## 2.2.8 RET a přístupy k jeho návrhu

Definice RET neboli Rapid Exit Taxiway:

*Jedná se o pojezdovou dráhu spojenou s RWY pod takovým úhlem a navrženou tak, aby umožňovala přistávajícím letadlům odbočení z dráhy při vyšších rychlostech než na jiných výjezdech, čímž se minimalizuje doba obsazení dráhy. [10]*

Z definice je patrná podstata i princip RET. Přesný design výjezdu pro rychlé odbočení je dán jednak předpisem L14, ale hlavně dokumentem – ICAO Doc 9157, *Aerodrome Design Manual, Part 2, Taxiways, Aprons and Holding Bays*. Zavedení jednotné světové normy pro návrh výjezdu pro rychlé odbočení má mnoho zjevných výhod. Posádky jsou seznámeny s konfigurací výjezdu a mohou očekávat jeho stejné parametry při přistání na jakémkoliv letišti s takovým výjezdem. Obecný náčrt výjezdu je zakreslen na obrázku č. 2 níže, na kterém je patrné, že tvar výjezdu je definován poloměrem oblouku, úhlem, který svírá s RWY, a navazujícím přímým úsekem. [11] [12]



Obrázek 2: Design RET (vytvořeno pomocí [12])

Úhel mezi osou RWY a osou výjezdu pro rychlé odbočení by se měl dle ICAO dokumentu pohybovat v rozmezí 25 až 45 stupňů. Doporučená hodnota pro úhel výjezdu je pak 30 stupňů. Poloměr odbočovacího oblouku je určen kategorií letiště. Tato kategorie je dána délkou vzletové a přistávací dráhy. Podle ní rozeznáváme dva druhy tvaru výjezdu pro rychlé odbočení. U letišť kategorie 1 nebo 2 by měl být poloměr oblouku 275 m a u letišť kategorie 3 nebo 4 by měl být poloměr oblouku 550 m. Výjezd pro rychlé odbočení musí za odbočovací obloukem obsahovat dostatečně dlouhou přímou část, která slouží k úplnému zastavení letadla před jakoukoliv křižující pojezdovou dráhou. [11]

Co se týče rychlosti, při které letoun uvolní dráhu, právě pomocí výjezdu pro rychlé odbočení, tak zde existuje několik názorových odlišností. Výsledná rychlost je totiž závislá na několika proměnných, jako je například stav povrchu RWY, zkušenost posádky nebo vliv meteorologických podmínek. Z toho důvodu byla rychlost 50 kt (93 km/h) přijata jako referenční pro stanovení tvaru RET tam, kde je kódové číslo letiště 3 nebo 4. [11]

Nejdůležitějším parametrem při návrhu výjezdu pro rychlé odbočení je jeho umístění. To je vyjádřeno vzhledem k začátku dráhy. Dokument ICAO 9157 zmíněný výše poskytuje pouze obecný popis výpočtu a obecné zásady při návrhu pozice RET. Umístění RET je funkcí vstupní rychlosti letadla na přistání, zpomalení neboli decelerace letounu na dráze a výstupní rychlosti, kdy je letoun schopen uvolnit dráhu pomocí RET. Postup určení pozice RET v dokumentu ICAO je založený na tzv. metodě tří segmentů, kde každý segment odpovídá délce určité fáze přistání letadla. Prostým součtem vzdáleností segmentů, je pak získána pozice RET od prahu dráhy. Tato metoda však nezohledňuje specifické vlastnosti provozu, ani vnější meteorologické podmínky, které zásadně ovlivňují přistání letadla. V praxi je určení pozice nového výjezdu založené na přesném měření chování konkrétního provozu za konkrétních podmínek. Proto by vhodnější posouzení pozice RET mělo být dosaženo podrobným zkoumáním výkonnostních charakteristik letounů. Doporučenou metodou pro určení pozice výjezdu pro rychlé odbočení je počítačová simulace založená na přesných datech chování letadel. [10] [11]

Jedním z nástrojů, který je využíván pro simulaci provozu na letišti je software AIRTOP od společnosti TRANSOFT SOLUTIONS. Jedná se o program umožňující přesné zakreslení infrastruktury letiště a následnou simulaci provozu. Uživatel tak může sledovat simulované letouny, včetně jejich parametrů v reálném čase, a měnit rozložení pojezdových drah, tedy i pozici výjezdů z dráhy. Výstupem programu je zobrazení časové úspory doby ROTA a její přepočtení na zvýšení dráhové propustnosti. Program byl použit při studii o možnosti navýšení propustnosti dráhy 05/23 na letišti Costa Smeralda v italské Olbii. Jedná se však o placený nástroj, který není volně dostupný. [13]

Studie z roku 2018 z americké univerzity Embry-Riddle Aeronautical University zkoumala závislost rychlosti letadla na dráze a jeho schopnosti uvolnit dráhu přes některý z výjezdů. Výzkum byl proveden na letišti Johna F. Kennedyho v americkém New Yorku. Studie použila data ze systému ASDE-X, který na letišti detailně snímá pohyb letadel, a to včetně měření jejich pozice i jejich dynamických parametrů, jako je právě rychlost. Letadla byla rozdělena do kategorií, a to na základě MTOW a počtu motorů. Použití dat ze systému ASDE-X v programu ArcMap umožnilo vizuálně zobrazit výskyt

provozu na jednotlivých výjezdech z dráhy a zkoumat, při jaké rychlosti letouny výjezd využily. Na základě uvedeného postupu bylo možné získat výslednou závislost mezi pozicí RET a schopností procentuálního využití daným typem provozu. Výsledek tedy vypovídá o tom, při jaké pozici RET by byla letadla určité kategorie na letišti JFK schopna výjezd využít. Například RET umístěný ve vzdálenosti 1676 m od prahu dráhy by byl využit 56 % provozu v kategorii L (MTOW od 5 670 kg do 136 080 kg). Limitace tohoto postupu řešení spočívá hlavně v požadavku, aby letiště bylo vybavené systémem ASDE-X. [14]

Dalším příkladem metody, která řešila problematiku umístění RET z dráhy je studie z roku 2018, provedená na letišti v srbském Bělehradu. Studie vychází z dat naměřených na tomto letišti a zkoumá časovou úsporu, které lze na dráze docílit vhodným umístěním RET. Studie je provedena v programu SimEvents jež je nadstavbou programu Simulink. Decelerace letounů je v tomto řešení závislá na bodu dotyku letadla se zemí a typu provozu. Nezohledňuje tedy proměnlivost vnějších podmínek. Celý postup vychází ze základního pravidla, kdy letadla musí nejprve zpomalit na rychlost stejnou nebo nižší, než je vstupní rychlost k využití RET (zde použito 60 km/h). V ideálním případě by se výjezd nacházel přesně v místě, kde letadlo dosáhne této rychlosti. V praxi je takové umístění, už kvůli různorodosti chování letadel, neproveditelné, proto je v práci zkoumán tzv. unnecessary taxi time, neboli nadbytečný čas pojíždění. Ten odpovídá rozdílu mezi dobou pojíždění ze simulace, kdy byl nový výjezd z dráhy různě posouván, a dobou v ideálním umístění RET popsáním výše. [15]

Podle amerického Federálního úřadu pro letectví je doporučeným postupem pro určení pozice výjezdu pro rychlé odbočení simulační model REDIM. Jedná se o program vytvořený americkou univerzitou Virginia Polytechnic Institute and State University. Tento matematický model byl vyvinut pro simulaci chování letounů na dráze po přistání a pro návrh pozice výjezdů pro rychlé odbočení. Model REDIM funguje na základě široké databáze více než 32 milionů přistání na více než 43 letišť v USA. Na základě této podrobné databáze je program schopen modelovat provoz různých parametrů. Jeho nespornou výhodou je, obecný popis chování provozu, který lze kalibrovat na konkrétní letiště i podmínky. Program byl použit na řadě letišť v USA jako například Las Vegas, Los Angeles aj. Jeho využití bychom našli také na evropských letištích. Pomocí modelu REDIM byl navržen RET například na letišti Málaga ve Španělsku. [5]

Vzhledem k široké databázi dat, dostupnosti podpůrných materiálů i jeho širokému využití byl pro účely řešení problému této práce vybrán simulační model REDIM.

## 3 Letiště Václava Havla Praha

Tato kapitola slouží jako souhrnný přehled informací týkajících se Letiště Václava Havla Praha. Jsou zde uvedeny charakteristiky letiště, aktuální stav letištní infrastruktury, plánovaný rozvoj letiště. Detailněji je pak popsána dráha 30, která je tématem diplomové práce.

### 3.1 Základní informace

Letiště Václava Havla Praha je hlavním mezinárodním letišťem v České republice. Nachází se přibližně 17 km severozápadně od centra Prahy v části zvané Ruzyně. Název Ruzyně patřilo letišti až do roku 2012, kdy bylo přejmenováno, a stalo se tak nositelem jména bývalého československého a českého prezidenta Václava Havla. Svojí rozlohou a objemem ročně přepravených cestujících patří na pozici největšího letiště na našem území. Je tak nejdůležitějším leteckým uzlem a jedním z klíčových vstupních bodů pro cestující přijíždějících do České republiky. [16]

### 3.2 Označení letiště

Kromě oficiálního názvu nese letiště také, stejně jako všechna ostatní mezinárodní letiště, několik zkratk, které jej označují v letecké terminologii. Dle Mezinárodní asociace leteckých dopravců, také známou pod zkratkou IATA, se jedná o kód PRG. Podle Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO), je letiště označeno zkratkou LKPR. Leteckým předpisem jsou letiště označována podle svých rozměrů. Konkrétní definování je zaneseno v předpisu L14 vycházející z tzv. Annexu 14 jakožto přílohy Úmluvy o mezinárodním civilním letectví. Letišti Praha přísluší označení 4E. První část, tedy číslo čtyři, značí, že letiště je vybaveno dráhou delší než 1 800 m. Písmeno E odpovídá maximálnímu rozpětí křídel letounu, které je letiště schopné odbavit. V tomto případě se jedná o letadlo do maximálního rozpětí 65 m. Souhrn označení Letiště Václava Havla Praha, doplněné o jeho nadmořskou výšku je uvedeno v tabulce č.3 níže. [17]

Tabulka 3: Označení letiště [17]

<b>Nadmořská výška [m.n.m]</b>	376
<b>ICAO kód</b>	LKPR
<b>IATA kód</b>	PRG
<b>Kategorie dle L14</b>	4E

### **3.3 Současná infrastruktura letiště**

Dnes je Letiště Václava Havla Praha rozděleno na dvě hlavní části označené podle světových stran. Jedná se o areál Sever a areál Jih. Hlavní odlišností mezi těmito dvěma sektory je typ provozu. Jižní část letiště zabezpečuje odbavení provozu soukromých nebo vládních letů, kdežto areál Sever slouží k odbavení veřejného provozu. [16]

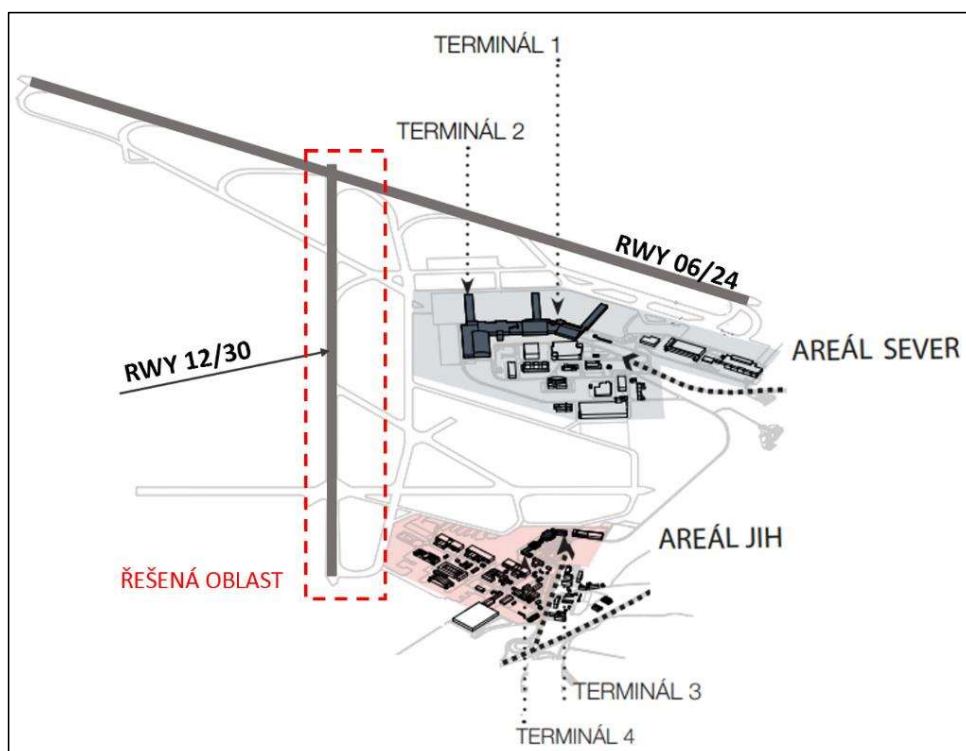
#### **3.3.1 Terminály**

K odbavení všech letů používá letiště celkem čtyři terminály, označené Terminál 1, 2, 3, 4. Terminál 1 bychom spolu s Terminálem 2 našli v severní části letiště. Terminál 1 je určen k odbavení letů směřujících mimo tzv. Schengenský prostor. Terminál 2 naopak slouží pro lety uvnitř tohoto prostoru. Zbylé dva terminály jsou umístěné v jižní části letiště. Terminál 3 je určen k odbavení soukromých letů a letů v kategorii všeobecného letectví. Terminál 4 je pak využíván k obsluze státních a vládních letů. Souhrnný přehled pozic jednotlivých terminálů i zanesení dvou areálů do mapy letiště přináší obrázek č. 3 na následující straně. [16]

#### **3.3.2 Dráhový a pojezdový systém**

Letiště Praha je vybaveno dvěma vzletovými a přistávacími drahami (RWY). Dráha orientovaná ve směru severovýchod-jihozápad je označena RWY 06/24 a je brána jako hlavní dráha. To jednak díky převládajícímu jihozápadnímu proudění, ale také kvůli protihlukovým postupům. Přiblížení na tuto dráhu neprobíhá nad hustě obydlenou oblastí, a tak je z důvodu redukce zátěže pro okolí využívána primárně. Druhá dráha orientována ve směru severozápad-jihovýchod nese označení RWY 12/30. Jelikož její osa protíná západní část města Prahy a také město Kladno, je z důvodu snížení hluku používána jako sekundární. Dalším důvodem, proč je RWY 06/24 používána jako hlavní je její rozměr. Délka hlavní dráhy činí 3 715 m, kdežto u vedlejší dráhy je to 3 250 m. Z důvodu bezpečnosti, obzvláště v nepříznivých meteorologických podmínkách, je výhodnější provoz hlavní dráhy. Detailnější rozbor pravidel pro stanovení dráhy v používání je proveden v pozdější kapitole. Obě dráhy se křížují. Začátek RWY 12 je umístěn přibližně v polovině hlavní dráhy 06/24. Souhrnné zobrazení areálů letiště i dráhového systému je vidět na obrázku č. 3. V praxi může nastat několik scénářů, kdy provoz na hlavní dráze není možný. Může to být například její rekonstrukce, její pravidelná údržba nebo když aktuální meteorologické podmínky nevyhovují předepsaným limitům. [17] I v takových případech musí být letiště schopné zajistit odbavení provozu, k čemuž využívá právě dráhu vedlejší. Z tohoto důvodu je vhodné se jí podrobněji zabývat. [17]





Obrázek 3: Areál LKPR (vytvořeno pomocí [18])

V praktickém provozu lze obecně pojezdový systém vyjádřit jako síť pojezdových drah (dále také TWY) s cílem vytvoření trasy pro letouny směřující z dráhy ke stojánce či naopak. To vše s cílem zajištění bezpečnosti provozu, tedy dodržení předepsaných vzdáleností od překážek a také s co možná nejvyšší plynulostí a efektivitou provozu. [4]

Diplomová práce se věnuje RWY 30 a možnostem navýšení její propustnosti. Na obrázku č. 3 výše je zobrazen prostor, který je v rámci práce řešen. Červená oblast ohraničuje vzletovou a přistávací dráhu 12/30 a přilehlé pojezdové dráhy, používané při jejím provozu. Ty slouží jako vjezdy na dráhu v případě vzletu a při přistání jako výjezdy k vyjetí z dráhy a uvolnění prostoru dalšímu provozu. [4]

### 3.3.3 RWY 30 a přilehlé pojezdové dráhy

V předchozích podkapitolách byly popsány základní vlastnosti dráhového systému na LKPR. Nyní bude proveden detailnější rozbor vedlejší dráhy ve směru 30, a to včetně popisu jednotlivých pojezdových drah napojených na tuto runway.

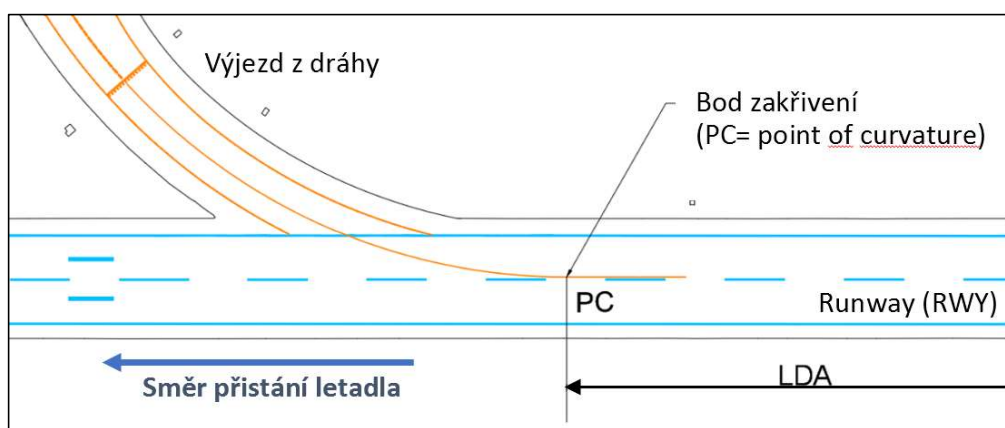
Aby bylo možné popsat provoz letadel na dráze 30, je třeba se seznámit i s dalšími parametry, které provoz ovlivňují. Prvním z nich je sklon dráhy. Práh dráhy 30 se nachází v nadmořské výšce 1231,9 ft, kdežto práh dráhy 12 je umístěn v nadmořské výšce 1160 ft. Rozdíl mezi těmito body činí na délce dráhy 3250 m celkem 71,9 ft. Ve směru RWY 30 je tedy dráha v průměrném klesání o sklonu 0,7 %,

což negativně ovlivňuje přistávající provoz. Druhým parametrem je šířka dráhy, která činí 45 m. Obě tyto veličiny budou použity v praktické části práce. [17]

Při používání RWY 30 je pilotům k dispozici celkem šest pojezdových drah, přímo napojených na tuto runway. Jedná se o TWY L, TWY R, TWY P, TWY G, TWY D a TWY F. Jejich umístění je vidět na obrázku č. 5 na další straně a také v letištní mapě, jež je přílohou č. 1 této práce. [17]

Pro vzlet z RWY30 jsou posádkám k dispozici celkem dva vjezdy, a to TWY L a TWY R. První z uvedených poskytuje pilotům celou délku dráhy pro rozjezd, tedy 3250 m. Pro vzlet z druhého vjezdu mají pak piloti k dispozici 2590 metrů dráhy. Pojezdová dráha TWY P není ve standardních případech používána jako vjezd na RWY 30 za účelem vzletu. Ve výjimečných případech může být použita například letouny z řad všeobecného letectví pro efektivnější rozdělení provozu, ale nejedná se o standardní postup. [8] [17]

Po přistání mohou piloti dráhu 30 uvolnit přes celkem šest výjezdů, které jsou charakterizovány použitelnou délkou pro přistání tzv. LDA (Landing distance available). Jedná se o vzdálenost měřenou od prahu dráhy, až do bodu označeném jako PC – *point of curvature* neboli bod zakřivení. Jedná se o bod, kde geometrie výjezdu přechází z rovného úseku do oblouku. Blíže je tato délka vysvětlená na obrázku č. 4 níže a odpovídá kótě s názvem LDA (měřeno od prahu RWY). [11] [17]



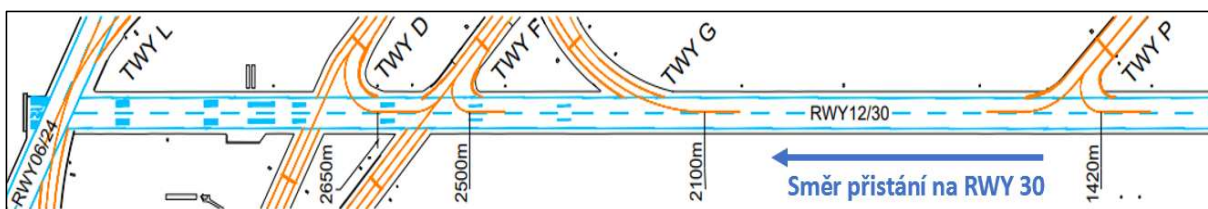
Obrázek 4: Měření LDA u výjezdu z RWY (vytvořeno pomocí [19])

První exit TWY P, vzdálený 1420 m od prahu RWY 30, slouží převážně letounům všeobecného letectví nebo menším letounům z kategorie dopravních letadel. Hlavní motivací pro využití tohoto výjezdu je jeho přímé napojení s areálem Jih. S ohledem na tupý úhel, který s osou dráhy svírá musí posádky za účelem bezpečného použití výjezdu zpomalit na nízkou rychlost. To z něj, v kombinaci s jeho krátkou vzdáleností 1420 m od prahu dráhy, činí nevyhovující výjezd pro většinu větších letadel. [9] [17]

Další výjezd TWY G je vzdálen 2 100 m od prahu dráhy, což poskytuje posádkám dostatečnou vzdálenost pro bezpečné zpomalení letadel. Avšak z pohledu maximální propustnosti je tato vzdálenost zbytečně velká. Letouny tak tráví na dráze více času, než je z pohledu hodnocení propustnosti dráhy nutné. Tvar výjezdu navíc není koncipován jako výjezd pro rychlé odbočení. Těsně za výjezdem se nachází jeho křížení s navazujícím pojezdovým systémem. To nutí posádky zpomalit na nízkou rychlost pojíždění, aby v případě potřeby byly schopné úplného zastavení. Výjezd TWY G tedy není, co se do hodnocení propustnosti dráhy týče, zcela vyhovující. [9] [17]

Letouny, které nejsou schopné využít TWY G, mohou dráhu uvolnit přes následující dva blízko u sebe umístěné výjezdy s názvy TWY F a TWY D. Ty slouží hlavně jako spojovací pojezdové dráhy pro pojíždění z dráhy 06 do areálu Sever nebo Jih a naopak. Svým tvarem a především úhlem vůči ose dráhy neumožňují výjezd na vyšší rychlosti, takže nejsou z pohledu propustnosti vedlejší dráhy zcela vhodné. [9] [17]

Na konci dráhy dochází ke křížení s RWY 06/24. Z tohoto bodu lze využít jako výjezd TWY L, která však slouží primárně jako výjezd z RWY 06. Používá se pouze ve výjimečných případech, kdy pilot nebyl schopen dráhu uvolnit pomocí některého z předešlých výjezdů. V později zmíněné analýze provozu nebyla tato možnost výjezdu použita ani jednou, proto s ní není dále uvažováno. [9] [17]



Obrázek 5: Výjezdy z RWY30 (vytvořeno pomocí [19])

Sumarizace jednotlivých výjezdů z RWY 30 je uvedena na obrázku č. 5 a v tabulce č. 4, včetně uvedení použitelné délky pro přistání neboli tzv. LDA.

Tabulka 4: Výjezdy z RWY 30 (vytvořeno pomocí [17] [19])

Označení výjezdu	LDA [m]
TWY P	1420
TWY G	2100
TWY F	2500
TWY D	2650

## 3.4 Rozvoj LKPR

Stejně jako jiné subjekty v letectví, tak i letiště musí reagovat na své aktuální potřeby a zdokonalovat tak svoji infrastrukturu. Jednou z takových reakcí je vytvoření plánu dlouhodobého rozvoje Letiště Praha, které má za cíl navýšit jeho kapacitu a připravit jej tak na neustále se zvyšující poptávku cestujících. Ať už se jedná o provozní záležitosti či problémy vycházející z bezpečnosti provozu, vždy je nutné novou infrastrukturu začlenit právě do takového plánu rozvoje. Proto je na místě se seznámit s plánovanými změnami letiště, které jsou relevantní pro tuto práci. [22]

### 3.4.1 Nový výjezd z RWY 24

Zdánlivě nesouvisejícím projektem je plánovaná výstavba nového výjezdu pro rychlé odbočení z dráhy 24. Sice se jedná o jinou runway, avšak problémy, které tato změna infrastruktury řeší jsou velice podobné těm, které jsou řešeny v rámci této práce. Proto je vhodné se s projektem blíže seznámit.

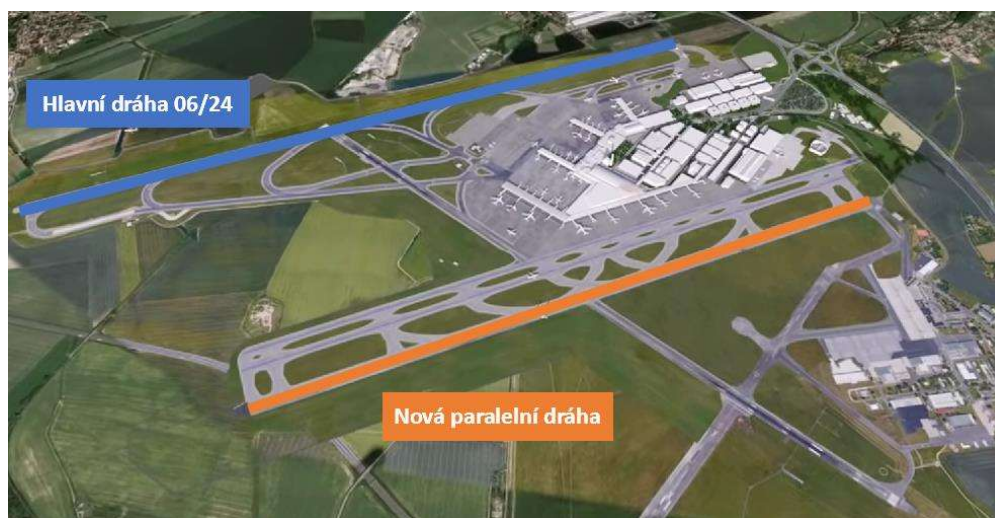
Cílem je vybudovat nový výjezd pro rychlé odbočení z RWY 24, a to mezi výjezdem TWY C, umístěným 1 310 m od prahu dráhy a výjezdem TWY D, umístěným 2 075 m od prahu dráhy. Rozmístění současných výjezdů z RWY 24 je vidět v příloze č. 1. Záměr vznikl v návaznosti na studii od Eurocontrolu, která zjistila, že současné rozmístění výjezdů z RWY 24 není zcela vyhovující. Doporučením studie je výstavba nového výjezdu pro rychlé odbočení. Kromě přínosu z pohledu bezpečnosti má projekt za cíl snížit dobu, kterou letouny na RWY 24 po přistání stráví. Studie prokázala, že první výjezd TWY C je z pohledu přistávajících letadel umístěn moc blízko a následující výjezd TWY D naopak zbytečně daleko. Tým Letiště Praha tedy navrhl nový výjezd s pracovním názvem RET Y, který by měl být umístěný 1 685 m od prahu dráhy 24. [20]

Sekundárním efektem projektu je zvýšení bezpečnosti provozu. Na stávajícím rozložení drah bylo zaznamenáno několik incidentů, kdy piloti neoprávněně vstoupili z hlavní dráhy na dráhu vedlejší. Projekt nového výjezdu z dráhy 24 je spojen s definitivním fyzickým oddělením hlavní a vedlejší dráhy na LKPR. Dráha 12/30 se tím zkrátí, a to změnou umístění prahu RWY 12 blíže k TWY D. Tento krok nebude mít na dráhovou propustnost ve směru přistání na dráhu 30 vliv. Proto je v rámci praktické části práce uvažováno se stávající délkou dráhy, tedy 3 250 m. [20] [21]

### 3.4.2 Dlouhodobý rozvoj a výstavba paralelní dráhy

Letiště Praha registrovalo v minulých letech zvyšující se poptávku po letecké dopravě a rostoucí počet ročně odbavených cestujících. Rok 2019 byl z tohoto pohledu maximem, kdy bylo zaznamenáno 17,8 milionů přepravených cestujících. Stávající kapacita terminálů však počítá s hodnotou 15,5 milionů cestujících. S cílem zkvalitnění služeb, udržení konkurenceschopnosti a zvýšení kapacity, vytvořilo Letiště Praha vizi svého dlouhodobého rozvoje. [22]

Tato vize zahrnuje plány na zvýšení počtu odbavovacích stání, rozšíření terminálů a výstavbu přílehlé infrastruktury pojezdových drah. Vrcholnou částí je pak výstavba zcela nové paralelní dráhy označené jako RWY 06R/24L, která by měla být umístěna jižně od stávající hlavní dráhy, což je znázorněno na obrázku č. 6. Celý plán dlouhodobého rozvoje je rozdělen do několika fází. Dohromady tvoří komplexní celek, schopný konkurovat okolním letištím a zajišťující bezpečné a plynulé odbavení provozu. Důležité je zdůraznit, že po dokončení všech částí tohoto projektu Letiště Praha nepočítá s dalším využíváním dráhy RWY 12/30 pro vzlety či přistání letadel. [22]

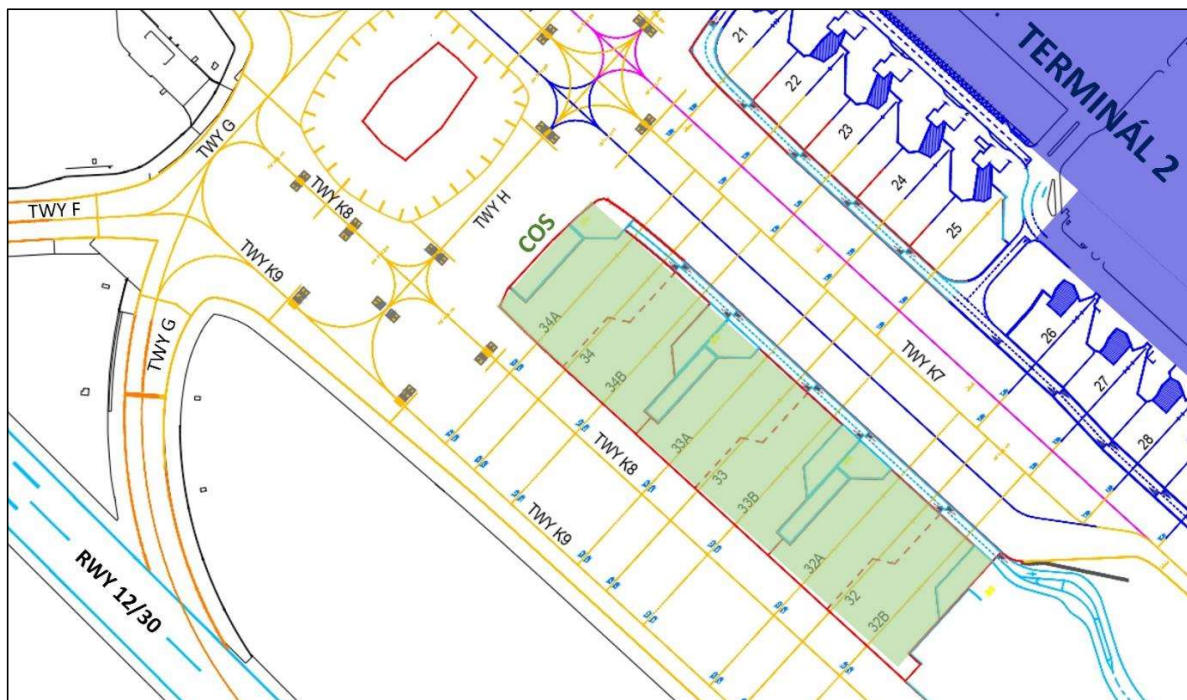


Obrázek 6: Projekt paralelní dráhy (vytvořeno pomocí [23])

Dokud však nedojde k výstavbě nové paralelní dráhy, je vhodné se zabývat možnostmi, jak zajistit tzv. zastupitelnost drah. V praxi to znamená, že vedlejší dráha 12/30 by měla být schopna zastoupit hlavní dráhu, tedy odbavit stejné množství provozu v případech, kdy hlavní dráha není k dispozici. Příkladem takové situace mohou být nepříznivé meteorologickým podmínky na hlavní dráze či nutná uzavírka hlavní dráhy z důvodu její pravidelné údržby. Z tohoto důvodu je diplomová práce zaměřena na vedlejší RWY 12/30, konkrétně na směr 30, s cílem snížit dobu, kterou letouny na dráze stráví, a umožnit tak zvýšení její hodinové propustnosti. [9] [17]

### 3.4.3 Centrální odmrazovací stání a úprava TWY

Během provozu může dojít k situacím, kdy je nutné povrch letadla před vzletem odmrazit. K takové proceduře slouží odmrazovací stání, kde je na letoun aplikována speciální kapalina. V současné době je v areálu Sever celkem šest ploch, na kterých se takové ošetření letadel provádí. Hlavní odmrazovací místa jsou umístěna u RWY 24, avšak při použití RWY 06, 12 nebo 30 je jejich pozice nevyhovující. Nelze totiž z důvodu delší doby pojíždění na vzlet zajistit potřebnou účinnost odmrazovací kapaliny. Zbylá místa pro odmrazování jsou umístěna v prostoru odbavovacích stání, která ale také nejsou zcela vyhovující. Proto byl v rámci rozvoje letiště vytvořen projekt výstavby tzv. Centrálního odmrazovacího stání – též označený jako COS. Ten bude umístěn mezi RWY 12/30 a Terminálem 2. V období, kdy není odmrazování vyžadováno, budou nově vzniklá stání sloužit jako klasická odbavovací stání. Plocha COS je graficky zobrazena na obrázku č. 7 níže zelenou barvou. V souvislosti s výstavbou projektu COS dojde také ke změně rozmístění pojezdových drah v řešené oblasti. Zásadní změnou relevantní pro účely této práce je výstavba nových pojezdových drah blíže k RWY 12/30. Konkrétně se jedná o pracovním názvem označené TWY K9 a TWY K8. Oproti dnešnímu stavu, kdy je zde umístěna pouze TWY L dojde k přiblížení pojezdové dráhy o 350 m blíže k RWY 12/30. [24]



Obrázek 7: Projekt Centrálního odmrazovacího stání (vytvořeno pomocí [19])

Požadavkem ze strany Letiště Praha bylo při návrhu navýšení propustnosti RWY 30 uvažovat s projektem COS a výkres změny infrastruktury provést s ohledem na nově vzniklé pojezdové dráhy. [9]

## 4 Provoz na LKPR

V této části práce je proveden popis provozu na LKPR. Druhá část kapitoly je věnovaná detailní analýze skutečných dat z provozu. Cílem tohoto rozboru je získat referenční hodnoty a zjistit parametry současného chování provozu na RWY 30.

### 4.1 Popis řízení provozu na LKPR

Každé letiště je unikátní svými specifikacemi, které se pak promítají do dat z provozu. Z tohoto důvodu je nutné se s nimi blíže seznámit a pochopit jednotlivé souvislosti.

#### 4.1.1 Koordinace provozu

S ohledem na každoročně narůstající počet pohybů letadel na LKPR a omezenou kapacitu, bylo třeba nastavit pravidla pro koordinaci letového provozu na letišti. Takové řízení se provádí za pomoci udělování tzv. letištních slotů. V praxi to znamená, že každý přilétávající i odlétávající provoz je povinen si vyžádat tzv. letištní slot, který určuje přesný čas vzletu nebo přistání. Výjimku pro toto pravidlo mají pouze lety v nouzi, lety související se záchranou lidského života nebo lety za účelem pátrání. Cílem takové koordinace je co možná nejvyšší efektivita řízení kapacity letištní infrastruktury i provozu samotného. [17]

#### 4.1.2 Provoz kritických typů letadel

Jak již bylo zmíněno v úvodních informacích, Letiště Václava Havla Praha patří do kategorie 4E. To jej limituje v provozu letounů s maximálním rozpětím křídel do 65 m. Provoz větších letounů, konkrétně pak:

*Airbus A380, 340-600, A350-1000, Boeing B777-300/300ER, B747-8, Antonov A124 a Lockheed C5.*

je možný, ale je upraven speciálními postupy blíže specifikovanými v AIP 2.20.5. [17]

Pro účely této práce je relevantní pouze mapa popisující trasy pojiždění pro kritické typy letadel. Je přílohou této práce – viz příloha č. 2. Všechny pojezdové dráhy sloužící jako vjezdy nebo výjezdy pro RWY 12/30 jsou zde vyznačeny zeleně. To znamená, že pro ně neplatí žádná omezení a jsou tak vhodná i pro pojiždění kritických typů letadel. [17]

### 4.1.3 Volba RWY v užívání

Letiště Praha při řízení provozu nepočítá se smíšeným provozem obou drah zároveň. Při používání hlavní dráhy je možné ve špičkách provozu využít dráhu vedlejší k jednotkám pohybů pro menší letouny jejichž stojánka se nachází v areálu Jih. Jedná se však o výjimečné případy. Vždy se tedy bere pouze plnohodnotný provoz buď na dráze hlavní, nebo na dráze vedlejší. [9]

Do rozhodovacího procesu o tom, která z drah bude v daný okamžik používána vstupuje mnoho proměnných, jako jsou například meteorologické podmínky, protihlukové postupy či jiná provozní omezení. Vždy se však preference volby dráhy v používání řídí následujícím pořadím:

1. RWY 24
2. RWY 06
3. RWY 30
4. RWY 12

Vzhledem k tomu, že se prodloužená osa dráhy 12/30 nachází nad hustě osídlenou oblastí, je snaha ze strany letiště využívat primárně dráhu hlavní. Provoz na vedlejší dráze je v současné době omezen následující regulací:

- Během denní doby platí zákaz vzletů nebo přistání pro proudové letouny s maximální vzletovou hmotností větší než sedm tun
- Během noční doby platí zákaz vzletů nebo přistání pro jakákoliv letadla

Na obě tyto restriktce však platí následující výjimky:

- pokud je dráha 06/24 mimo provoz
- pokud není v provozu systém ILS pro příslušnou RWY
- v případě, že jsou na povrchu RWY06/24 nepříznivé podmínky a brzdící účinek na dráze byl klasifikován horší než hodnota DOBRÝ
- v případě, že byl hlášen stříh větru nebo pokud se v blízkosti letiště nacházejí bouřky, které ovlivňují odlet letadla nebo jeho přiblížení
- v případě, že boční složka větru na RWY 06/24 přesáhla hodnotu 15 uzlů nebo pokud hodnota zadní složky přesáhla hodnotu 5 uzlů
- pokud se jedná o let v nouzi nebo let pro záchranu života nebo let detailněji popsán v bodě 2.21.2.5 v AIP



#### 4.1.4 HIRO procedury

Na LKPR platí v denní době tzv. postupy HIRO – High Intensity Runway Operations. Jejich cílem je snížení doby, které letoun stráví na vzletové a přistávací dráze na minimum. Tyto postupy se vztahují na letouny z kategorie MEDIUM JET a MEDIUM PROP (určeno kategorií WTC a druhem pohonu letadla). Blíže je rozdělení letadel do těchto kategorií popsáno v kapitole 2.2.4 Jelikož se diplomová práce věnuje pouze RWY 30, budou konkrétní procedury popsány pouze pro tento směr dráhy. [17]

V případě příletů na dráhu 30 je kladen ze strany ŘLP požadavek na uvolnění dráhy po přistání přes výjezd TWY G, který je umístěn 2 100 m od prahu dráhy. Souhrn pravidel je uveden v tabulce č. 5 níže. Je potřeba zmínit, že všechny tyto postupy jsou použité pouze, pokud to aktuální podmínky dovolí. Vždy by měla být brána bezpečnost provozu jako nejdůležitější faktor v rozhodování. Postup HIRO se vztahuje i na odlétávající letouny. Práce se však zabývá přílety na dráhu 30, proto zde nejsou odlety rozebrány. [17]

Tabulka 5: Postupy HIRO při přistání na RWY 30 [17]

Kategorie letadla	Preferovaně použitý výjezd
MEDIUM JET	TWY G (2 100m)
MEDIUM PROP	TWY G (2 100m)

#### 4.1.5 Propustnost drah

Jak již bylo vysvětleno, propustností dráhy rozumíme maximální počet pohybů, který je možný na dráze provést za jednotku času (nejčastěji za jednu hodinu). Tabulka č. 6 níže uvádí souhrn kapacitních limitů pro dráhy na LKPR. Diplomová práce se sice zabývá vedlejší dráhou, avšak pro srovnání je uvedena i dráha hlavní. Z tabulky vyplývá nižší kapacitní hodnota pro dráhu vedlejší. To je způsobeno především horším rozmístěním výjezdů z dráhy, než kterou disponuje dráha hlavní. V případě přesunu provozu na vedlejší dráhu, tak může nastat problém s naplněním její kapacity. To může mít za následek úpravu slotové koordinace a přesun provozu do následujících hodin, což je spojené s nežádoucím zpožděním letů. [9]

Tabulka 6: Kapacita drah na LKPR (vytvořeno pomocí [26])

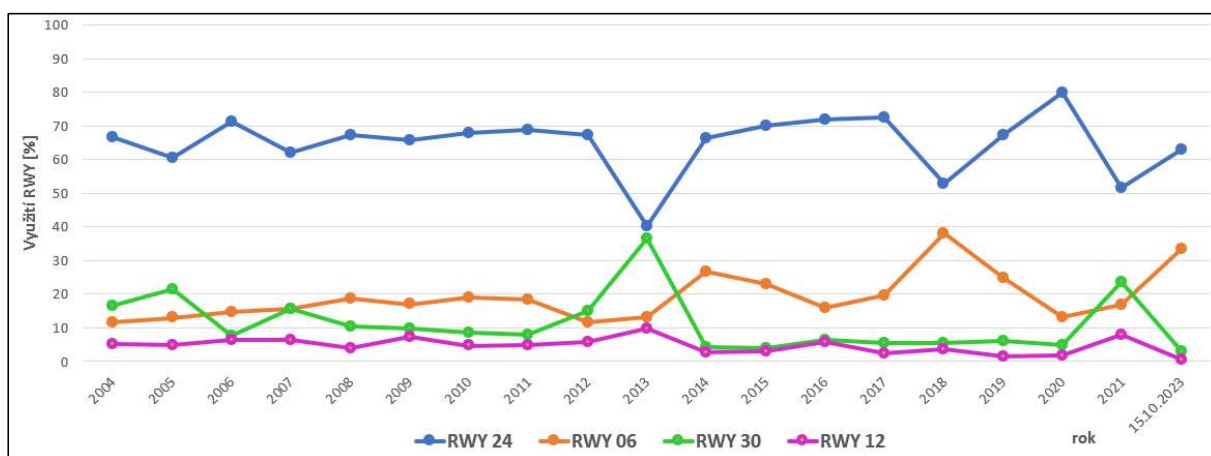
Označení RWY	Kapacita [pohybů/hodinu]
06/24	46
12/30	38

## 4.2 Analýza provozu na LKPR

Za použití dat získaných od Letiště Praha a Řízení letového provozu České republiky je v této části práce provedena detailní analýza provozu na LKPR. Díky závěrům této analýzy lze blíže popsat řešený problém a stanovit postup pro jeho řešení.

### 4.2.1 Statistika využití drah

Graf na obrázku č. 8, který zaznamenává využití jednotlivých drah od roku 2004 do 15.10.2023, potvrzuje tvrzení o preferenci volby drah v provozu. Z důvodu minimální hlukové zátěže na okolí i přetrvávajícímu jihozápadnímu proudění dominuje RWY 24.



Obrázek 8: Graf využití drah na LKPR (vytvořeno pomocí [26])

Z grafu je sice patrné, že letiště ve většině případů využívá k odbavení provozu dráhu hlavní. Plnohodnotné odbavení provozu však musí být zajištěno i v případech, kdy hlavní dráhu nelze, ať už z jakéhokoliv důvodu použít. Proto je vhodné, se blíže zabývat výkony na vedlejší dráze a možnostmi, jak provoz zefektivnit.

V grafu jsou vidět dva výkyvy, kdy došlo ke zvýšení provozu na dráze vedlejší. Oba jsou způsobené omezením provozu hlavní dráhy z důvodu její opravy. V roce 2013 se jednalo o generální rekonstrukci uzavírající hlavní dráhu téměř na pět měsíců. [9]

V roce 2022 došlo k uzavření dráhy v období 28.3.-31.6. a provoz musel být opět odkloněn na dráhu vedlejší. Jednalo se o pravidelnou údržbu povrchu dráhy, ale také o rekonstrukci výjezdu TWY B z dráhy 06. Během této tři měsíce trvající rekonstrukce bylo zaznamenáno celkem 20 441 pohybů na RWY 30 a 6 380 pohybů na RWY 12. Převedením na procentuální vyjádření získáváme závěr, že během opravy hlavní dráhy v roce 2022, byl směr 30 využit v 76,2 % případech a opačný směr 12 v 23,8 % provozu. [26] [27]

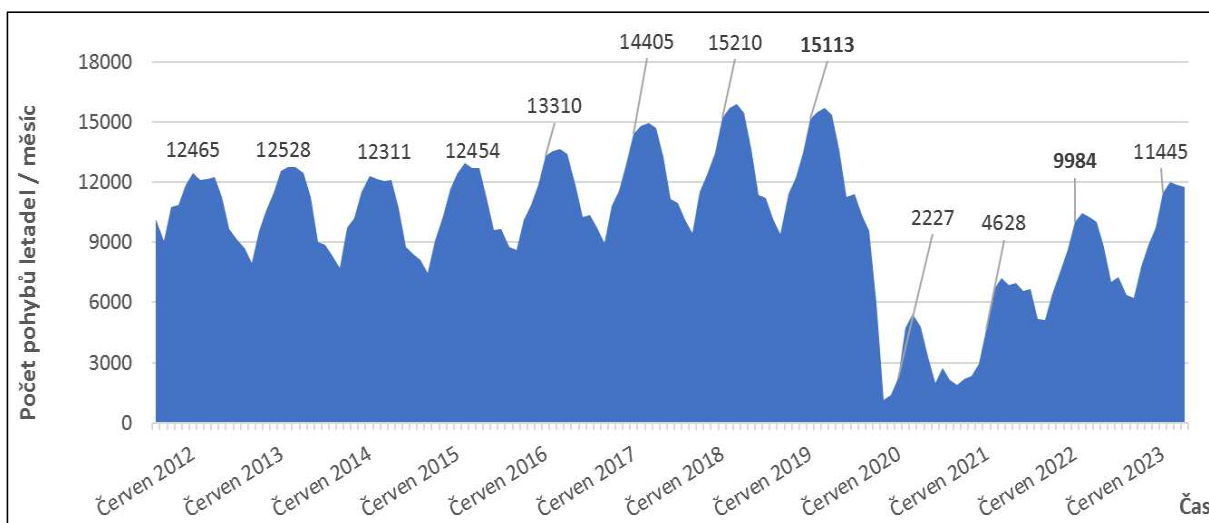
Ve všech následujících statistikách je uvažováno jako sledovací období právě období uzavření hlavní dráhy v roce 2022, tedy od 28.3.2022 do 31.6.2022. [27]

#### 4.2.2 Výkony na RWY 30

Nyní je na místě zjistit, jak si vedlejší dráha vede, co se do počtu pohybů a své kapacity týče. Pro tyto účely byl opět využit balíček dat z období údržby hlavní dráhy v roce 2022.

Zde byl nalezen den s nejvyšším počtem pohybů za hodinu, kterým byl 17.6.2022. V tento den bylo zaznamenáno maximum, tedy 31 pohybů letadel za hodinu. To je sice nižší číslo, než je kapacitní limit vedlejší dráhy, který činí 38 pohybů za hodinu. Je však nutné zmínit, že ve sledované době byla letecká doprava stále ve fázi obnovy po covidové krizi, jak příkládá graf na obrázku č. 9. [26]

Zde je patrný dlouhotrvající nárůst počtu pohybů až do roku 2018, kdy dosáhl maxima. Po propadu, způsobeným pandemií COVID19 a restrikcemi s ní spojenými, je možné sledovat postupnou obnovu provozu. V grafu jsou číselně uvedeny počty pohybů za měsíc červen pro jednotlivé roky. Měsíc červen byl vybrán, jelikož v něm bylo nalezeno maximum pohybů na vedlejší dráze v roce 2022. Aby bylo možné provést srovnání s před covidovým provozem, je nutné určit koeficient, který zohlední tento nárůst provozu. [26]



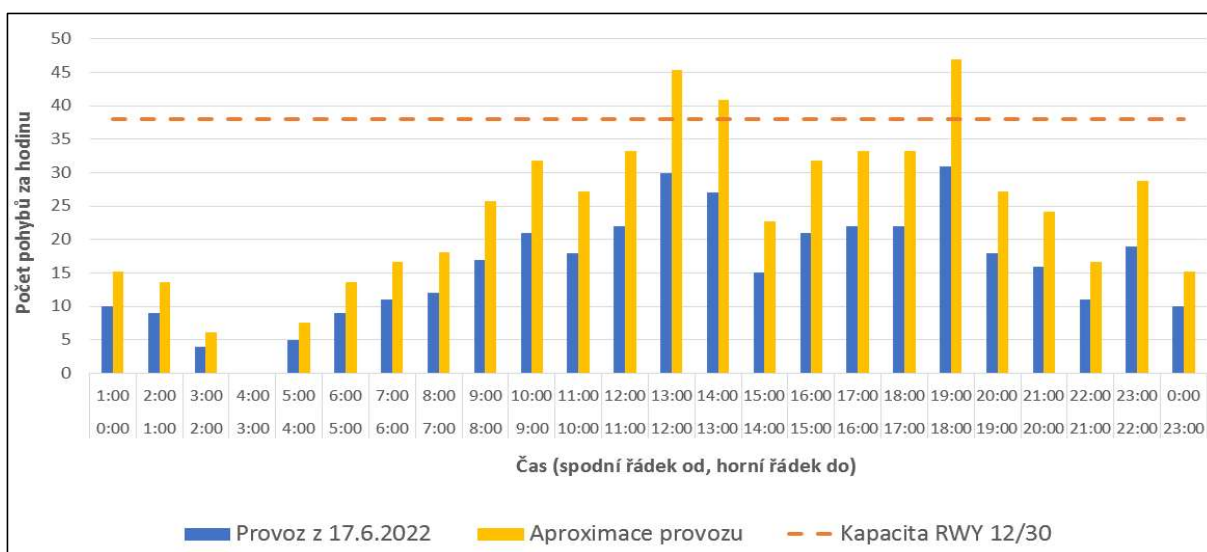
Obrázek 9: Graf počtu pohybů na LKPR v čase (vytvořeno pomocí [26])

V červnu roku 2018 bylo na LKPR zaznamenáno 15 210 pohybů, kdežto za rok 2022 ve stejném měsíci 9 984 pohybů [26]. Výpočet koeficientu je uveden níže.

$$K = \frac{\text{počet pohybů v červnu 2018}}{\text{počet pohybů v červnu 2022}} = \frac{15\,210}{9\,984} = 1,52$$

Koeficient K vypovídá o kolikrát byl v roce 2018 provoz sinější než v roce 2022 ve stejném měsíci a je použit v navazujícím výpočtu na další stránce.

Za pomoci vypočteného koeficientu můžeme provést přibližnou aproximaci výkonů na vedlejší dráze. Vše je uvedeno v grafu na obrázku č. 10. Modrou je zobrazen průběh provozu z 17.6.2022. Zde je patrné, že všechny hodinové pohyby byly pod kapacitním limitem, který je zobrazen červenou čarou a odpovídá hodnotě 38 pohybů za hodinu. Oranžový provoz odpovídá stejnému provozu, ale vynásobenému koeficientem K. Díky tomu je možné vyhodnotit, jak by na RWY 30 vypadal provoz předcovidové intenzity. Z grafu je patrné, že by došlo k překročení hodinové kapacity dráhy. Pravděpodobně by tak došlo k přelévání provozu, který je nad limitem dráhy do pozdějších hodin. To by bylo spojené s úpravou slotové koordinace letů a jejich nežádoucího zpoždění.



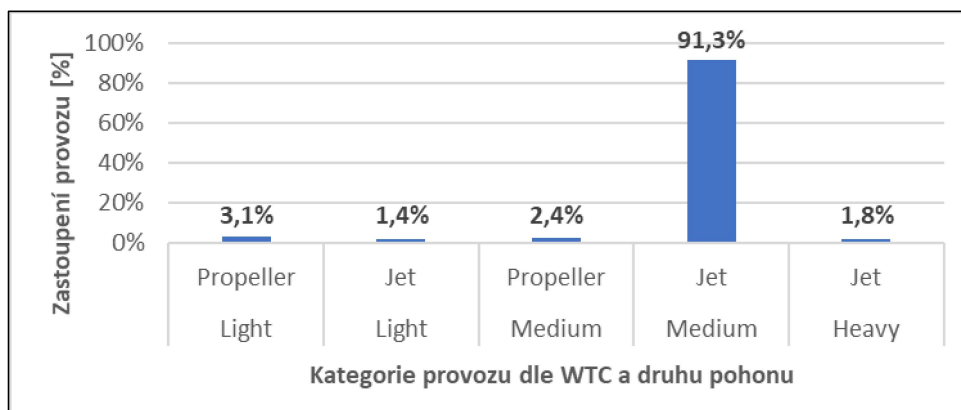
Obrázek 10: Graf počtu pohybů 17.6.2022 a aproximace provozu (vytvoreno pomocí [26])

Toto tvrzení je také podpořeno předpokladem Letiště Praha, které při dalším navýšení intenzity provozu na vedlejší dráze očekává možný problém s naplněním její hodinové kapacity. Z tohoto důvodu je na místě se vedlejší dráhou ve směru 30 zabývat a popsat možnost, jak konkrétně docílit zvýšení její hodinové propustnosti. [9]

#### 4.2.3 Skladba provozu na RWY

Dalším krokem je pak analýza tzv. skladby provozu, která udává zastoupení jednotlivých kategorií letadel. Pro účely analýzy byla zvolena kategorizace podle vygenerované turbulence v úplavu tzv. WTC a podle druhu pohonu letadla. Kritéria pro rozdělení letadel, včetně jejich vysvětlení, jsou popsány v kapitole 2.2.4. Během údržby hlavní dráhy v roce 2022 bylo zaznamenáno největší zastoupení provozu v kategorii MEDIUM JET, které tvořilo 91,3 % celkového provozu [25]. Vzhledem k majoritnímu podílu této kategorie v rámci celého provozu i v návaznosti na konzultaci s Letištěm Praha je nadále řešena pouze tato kategorie letadel.

Rozdělení provozu ostatních kategorií je vidět v grafu na obrázku č. 11. Kromě výše rozebrané kategorie MEDIUM JET je patrné téměř rovnoměrné rozdělení zbylých kategorií. Druhé nejvyšší zastoupení nese kategorie letounů LIGHT PROP, kam spadají převážně letouny všeobecného letectví, jako je například Zlín Z142. [26]

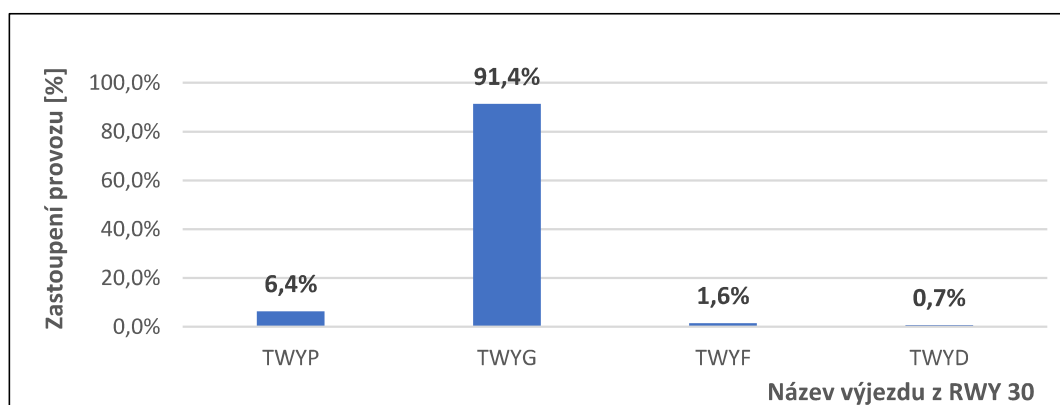


Obrázek 11: Graf skladby provozu na LKPR (vytvořeno pomocí [26])

#### 4.2.4 Rozdělení provozu MEDIUM JET dle výjezdů

V dalším kroku bylo potřeba zjistit, které výjezdy jsou kategorií MEDIUM JET nejvíce využívány, tedy distribuci provozu na jednotlivých výjezdech z RWY 30. Ve sledovaném období bylo změřeno rozdělení provozu zobrazené v grafu na obrázku č. 12.

V drtivé většině případů využil provoz typu MEDIUM JET k uvolnění RWY 30 výjezd označený TWY G. Jeho umístění 2100 m od prahu dráhy poskytuje dostatečnou vzdálenost pro bezpečné zpomalení. Druhým nejvyužívanějším výjezdem je TWY P. Ten využívají hlavně letouny, jejichž stojánka se nachází v areálu Jih a zpravidla se jedná o privátní lety. Z grafu je také patrné, že poslední dva výjezdy byly využity minimálně. Jedná se spíše o výjimečné případy, kdy pilot z nějakých důvodů nemohl využít TWY G, například kvůli jinému provozu, nebo kvůli zhoršeným podmínkám pro brzdění a zvolil výjezd následující. [26]



Obrázek 12: Graf využití výjezdů na RWY30 (vytvořeno pomocí [26])

#### 4.2.5 Statistika ROTA pro RWY 30

Aby bylo možné při návrhu navýšení propustnosti stanovit časovou úsporu doby ROTA na RWY 30, je nejprve nutné zjistit její stávající hodnotu. Pro tyto účely byla opět použita data z období údržby hlavní dráhy v roce 2022. Předešlá studie provozu prokázala většinové zastoupení letadel z kategorie MEDIUM JET. Proto jsou v analýze času ROTA uvažovány pouze letouny spadající do této kategorie. Tabulka č. 7 níže zobrazuje statistiku průměrné doby ROTA pro jednotlivé výjezdy z RWY 30 ve sledovaném období.

Tabulka 7: Průměrná ROTA na výjezdech z RWY 30(vytvořeno pomocí [26])

Použitý výjezd	TWY P	TWY G	TWY F	TWY D
Průměrná ROTA [s]	50,597	58,445	70,986	74,468

Jednou z nejdůležitějších hodnot pro další zkoumání je čas 58,445 vteřin. Za tuto dobu dráhu 30 průměrně uvolnily letouny v kategorii MEDIUM JET přes výjezd TWY G. Pokud bychom uvažovali použití všech výjezdů, pak průměrná doba ROTA byla za sledované období 58,249 vteřin. Obě tyto průměrné hodnoty budou důležité v návrhové a validační části práce, kde slouží jako jedna z hlavních referenčních hodnot. [26]

#### 4.3 Závěr a stanovení dalšího postupu

Během popisu současné situace bylo zjištěno několik dílčích poznatků. Jedním z nich je, že majoritní část provozu na LKPR tvoří letadla v kategorii MEDIUM JET. Proto se diplomová práce dále zabývá tímto užším výběrem provozu. Letadla této kategorie pro svůj výjezd z dráhy 30 využívají převážně TWY G. Tvar výjezdu ani jeho vzdálenost však není z pohledu maximální propustnosti dráhy efektivní. Letouny tak tráví na dráze zbytečně dlouhý čas, což negativně ovlivňuje její maximální propustnost.

Účinným nástrojem pro snížení průměrného času ROTA na dráze je přidání nového výjezdu pro rychlé odbočení tzv. RET. Dle dostupných dokumentů, dosavadních zkušeností i studie od Eurocontrolu je doporučená pozice výjezdu pro kategorii MEDIUM JET v rozmezí 1500–1800 m od prahu dráhy [17]. V rámci této diplomové práce je tedy nadále řešena možnost výstavby RET, a to s cílem navýšit hodinovou propustnost dráhy 30 pro přistání. Přesné umístění výjezdu pro rychlé odbočení by mělo být založené na detailním zkoumání přistávajícího provozu, a to pomocí simulačních nástrojů. Pro účel co nejpřesnějšího návrhu pozice nové RET byl použit simulační model, který je podrobně popsán v následující kapitole. Nastavení simulačního modelu je provedeno na základě hodnot získaných z detailní analýzy provozu v kapitole 4.2.

## 5 Simulační model REDIM

Simulační model REDIM neboli Runway Exit Design Interactive Model je projektem americké univerzity Virginia Polytechnic Institute and State University. Jedná se o matematický model vyvinutý pro simulaci chování letounů na dráze po přistání a pro návrh pozice výjezdů pro rychlé odbočení. Tento projekt je podporován americkým Federálním úřadem pro letectví, známým také pod zkratkou FAA. V dokumentu od FAA, který se věnuje výjezdům pro rychlé odbočení, je model REDIM uveden jako doporučený software pro návrh pozice RET. [5] [28]

### 5.1 Základní popis

Model využívá kinematické rovnice k popisu dynamiky přistávajícího letadla a algoritmus dynamického programování k nalezení optimálního umístění RET. Cílem optimalizačního algoritmu je minimalizovat průměrný čas obsazenosti dráhy při přistání. [5]

Model využívá data naměřená na letištích v USA, která jsou vybavena systémem ASDE-X, Jedná se o radarový systém, který se používá pro sledování pohybu letadel na letištní ploše. Systém pomáhá předcházet kolizím a zvyšuje efektivitu provozu. Díky systému lze přesně měřit klíčové parametry přistávajícího letadla, jako je například jeho rychlost nebo doba ROTA. Během měření v letech 2015-2020 na celkem 43 letištích v USA byla nasbírána data, obsahující více než 32 milionů přistání pro více než 300 typů letadel. Databáze těchto dat tak tvoří solidní základ pro přesnou simulaci chování letadel na dráze. [5]

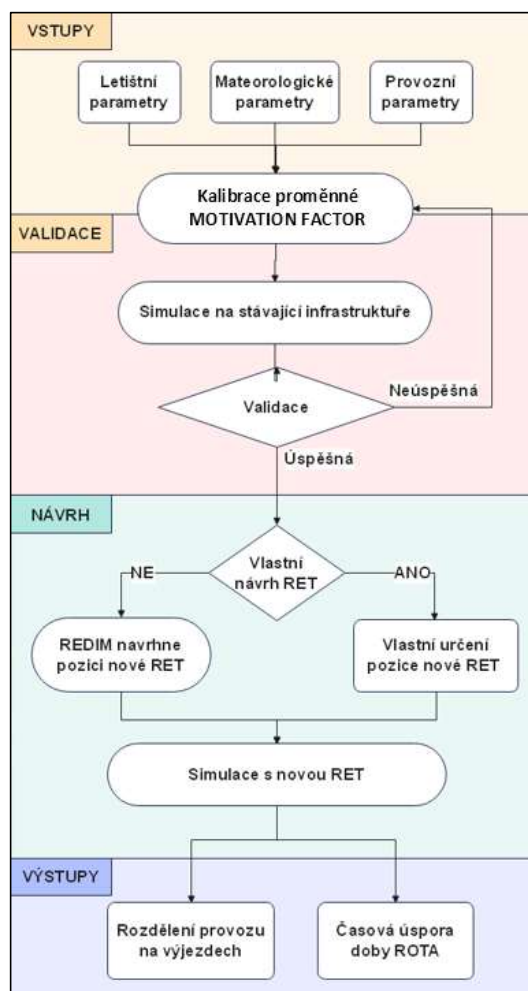
### 5.2 Popis fungování modelu

V následující kapitole je vysvětlen princip modelu REDIM a algoritmus jeho použití. Grafické zobrazení je vysvětlené na obrázku č. 13 na následující straně.

Nejprve jsou nastaveny vstupní parametry simulace. Jedná se například o průměrnou teplotu vzduchu, nadmořskou výšku letiště, rozmístění výjezdů nebo skladbu provozu. Blíže je nastavení vstupních faktorů popsáno v šesté kapitole s uvedením konkrétně zvolených hodnot. Poté je provedeno nastavení proměnné, která slouží ke kalibraci simulace na konkrétní letiště a specifický druh provozu. Jde o tzv. MOTIVATION FACTOR neboli motivační faktor. Jedná se o proměnnou, pomocí které lze ovlivnit průběh přistání letadla na dráze, a tím jeho dobu ROTA. Motivačním faktorem lze ovlivnit, s jak velkou motivací bude chtít posádka využít dřívější výjezd z dráhy, a tedy s jak velkou průměrnou intenzitou bude letadlo na dráze brzdit. Blíže je proměnná vysvětlena v navazující kapitole 5.3. [5]

Nastavením všech vstupních parametrů může být provedena simulace na stávajícím stavu letištní infrastruktury. Z jejich výstupních hodnot je nadále provedena validace. Ta se již neprovádí přímo v programu, je tedy na každém uživateli, jak velkou míru chybovosti stanoví a za jakých podmínek uzná simulaci za validní. Pokud hodnoty simulace nevyhovují míře spolehlivosti modelu, je nutné změnit kalibrační parametr a provést simulaci znovu, dokud není prokázána validita simulace. [5]

Po ověření, že je model validní může následovat návrhová část, která se dělí na dvě větve. Rozhodujícím kritériem dělení je zdroj návrhu pozice nového výjezdu. Uživatel může nastavit pozici i tvar nové RET podle svých požadavků. Nebo může nechat model, aby sám z dostupných dat stanovil, kde by byla pozice nové RET nejvýhodnější. Po nastavení nového výjezdu, ať už uživatelem nebo modelem, je provedena nová simulace, tentokrát již s možností využít nový výjezd z RWY. Jako výstupní hodnota na závěr je sledována průměrná obsazenost dráhy neboli doba ROTA a kolik procent letadel by nově vzniklý výjezd využilo. Za účelem lepšího pochopení funkce modelu byl vytvořen grafický algoritmus na obrázku č. 13, který shrnuje výše popsany princip. [5]



Obrázek 13: Algoritmus programu REDIM

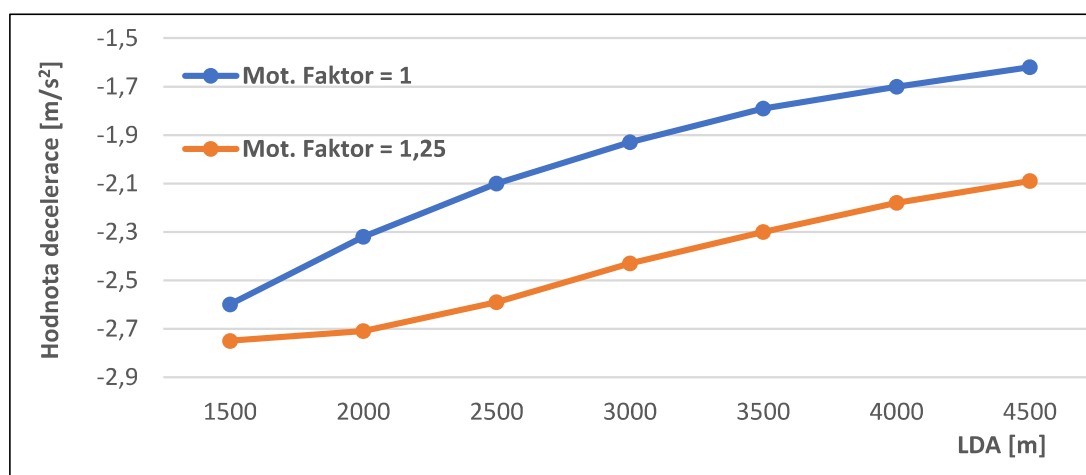


### 5.3 Motivační faktor

Skladba provozu, vnější podmínky nebo parametry dráhy, to jsou všechno vstupní faktory, které mají citelný vliv na přistávající provoz. Z hlediska simulace jsou však pevně dané. Jediným prostředkem pro úpravu chování letadel v simulaci je změna hodnoty již zmíněného kalibračního parametru MOTIVATION FACTOR neboli motivačního faktoru. [5]

V jednoduchosti lze motivační faktor popsat jako proměnnou, která v sobě zahrnuje motivaci pilota použít dřívější výjezd. Jeho změnou lze docílit zvýšení či snížení hodnoty decelerace letadla nebo změnu pozice dotyku letounu se zemí. Hodnota 1.0 motivačního faktoru odpovídá nominálnímu chování letadel. S jeho rostoucí hodnotou se zvyšuje úroveň decelerace a snaha posádky uvolnit dráhu pomocí dřívějšího výjezdu. Proměnná může nabýt hodnot od 0,5 do 2. Dle doporučeného postupu návrhu, by se měl motivační faktor pohybovat v rozmezí 0,8 až 1,2. V případě vyšší hodnoty než doporučené, by mohlo dojít k chování letadel, které je spojené například s vyšším opotřebením brzd nebo sníženým komfortem cestujících. Důležité je zmínit, že chování všech letadel při všech hodnotách motivačního faktoru je v souladu s jejich fyzikálními i kinematickými možnostmi. Zvýšení motivačního faktoru z 1,0 na 1,2 lze pro úzkotrupé letouny (př. Airbus A320) interpretovat, jako zvýšení decelerace o cca 20 %. [5]

Názorný příklad změny chování letadla při brždění na dráze je vidět na obrázku č. 14. Pro konkrétní typ letadla Airbus A320 jsou zde vykresleny křivky určující závislost hodnoty decelerace na vzdálenosti LDA. Horní křivka reprezentuje změnu parametru decelerace v závislosti na pozici výjezdu při nastaveném motivačním faktoru na 1,0. Spodní křivka pak znázorňuje to samé, ale s nastaveným motivačním faktorem na 1,25. Z grafu je patrné, že zvýšení parametru o 25 % má přibližně stejně velký dopad na hodnotu decelerace. [5]



Obrázek 14: Graf vlivu motiv. faktoru na průběh zpomalení (vytvořeno pomocí [5])

## 6 Nastavení simulace

Aby mohl simulační model REDIM poskytnout co nejlepší výstupy, je nutné co nejpřesněji nastavit vstupy simulace. Ty tvoří řada parametrů, které mají vliv na chování letadel v simulaci. Tyto faktory byly rozděleny do třech oblastí podle svého charakteru. Jejich konkrétní nastavení je uvedeno v následujících podkapitolách.

### 6.1 Letištní parametry

Do této části byly zařazeny všechny faktory spojené s parametry letištní infrastruktury, a to jak vzletové a přistávací dráhy, tak jednotlivých výjezdů.

#### Rozměry RWY

- Délka dráhy = 3 250 metrů
- Šířka dráhy = 45 metrů [17]

#### Poloha letiště

- Nadmořská výška letiště = 376 metrů nad mořem [17]

#### Tvar výjezdu

Výjezd je v simulačním modelu definován svým tvarem pomocí třech základních veličin. Jedná se o poloměr oblouku středového značení, úhel výjezdu vůči ose dráhy a vzdálenost vyčkávacího místa od osy RWY. Souhrn parametrů, tak jak byly zvoleny v simulaci, je uveden v tabulce č. 8.

Tabulka 8: Nastavení výjezdů v simulaci (vytvořeno pomocí [19])

Označení výjezdu	Poloměr oblouku [m]	Úhel [stupně]	Vzdálenost vyčkávacího místa [ft]
TWY P	32	135	295
TWY G	300	38	328
TWY F	30	122	328
TWY D	55	132	328

#### Pozice výjezdu a sklon RWY

Na první pohled se jedná o dvě proměnné, které se sebou vzájemně nesouvisí. V modelu REDIM je však metoda na opravu sklonu dráhy, která využívá právě pozice výjezdu. Pro sklon dráhy 0,7 % (sklon RWY 30) je nutné skutečné umístění vydělit hodnotou 1,07. Souhrn pozic výjezdů včetně jejich skutečné hodnoty je uveden v tabulce č. 9. [5]

Tabulka 9: Oprava pozice výjezdu v simulaci (vytvořeno pomocí [5] [17])

Označení výjezdu	LDA ve skutečnosti [m]	LDA opravená o sklon RWY [m]
TWY P	1420	1321
TWY G	2100	1953
TWY F	2500	2325
TWY D	2650	2465

Detailní analýza provozu prokázala, že výjezdy TWY F a TWY D byly letouny v kategorii MEDIUM JET použity minimálně. Aby bylo možné zajistit maximální přesnost chování modelu, byly tyto výjezdy provozu v simulaci znemožněny. Proto je zastoupení provozu na těchto exitech v pozdějších grafech rovno nule. Tento postup byl konzultován, jak s vývojáři programu, tak s Letištěm Praha. S ohledem na malé zastoupení letadel na těchto výjezdech, je možné je pro účely simulace zanedbat. Je však vhodné tento krok zohlednit při finálním stanovení výsledků a závěrů práce.

## 6.2 Meteorologické parametry

Jak již bylo popsáno v první kapitole, počasí má zásadní vliv na chování provozu na dráze. Přímým způsobem lze v simulačním modelu ovlivnit dva faktory. Pro nastavení těchto parametrů byly použity jednak statistické údaje Českého hydrometeorologického ústavu, ale také databáze zpráv o počasí METAR z období údržby hlavní dráhy v roce 2022.

### Teplota

Za sledované období byla změřena průměrná teplota 11,5 °C (měřeno na stanici Praha Ruzyně). Model REDIM umožňuje pouze celočíselné zadání teploty, proto byla zvolena hodnota 12 °C jako vstupní parametr do simulace. [29]

### Mokré podmínky

Ve sledovaném období bylo ze zpráv METAR vyhodnoceno 36 % případů, kdy byly zaznamenány podmínky indikující mokrý stav povrchu RWY. Tato hodnota byla určena pomocí funkce, jež vyhledávala ve zprávách METAR kódy, které byly spojeny se sněhem, srážkami aj. u kterých lze předpokládat mokrý stav povrchu vzletové a přistávací dráhy. [25]

## 6.3 Provozní parametry

Poslední balíčkem parametrů jsou faktory vycházející ze samotného provozu. Některé byly nastaveny přímo v návaznosti na provedenou analýzu provozu, u některých musela být zvolena experimentální metoda změny a sledování průběhu chování modelu.

### Skladba provozu

Databáze modelu REDIM obsahuje celkem 327 typů letadel. Každé je definováno svojí křivkou decelerace i vstupními parametry na přistání [5]. Z provedené analýzy provozu na LKPR, bylo možné získat detailní skladbu provozu, a to pomocí počtu provedených přistání u každého typu. Výsledné hodnoty však nemohly být použity přímo v simulaci.

Model REDIM je limitován minimálním výskytem typu letadla, a to hodnotou 0,1 % [5]. Pokud se tedy nějaký typ vyskytl na LKPR méněkrát, nemohl by být započítán, což by mohlo ovlivnit výslednou simulaci. Z tohoto důvodu byla zvolena metoda sloučení letadel s menším zastoupením ve skladbě do jednoho typu letadla, které má stejné vlastnosti. Obecný příklad takového spojení je uveden níže.

U letounu A byl zaznamenán výskyt odpovídající 0,06 %, letoun B byl zaznamenán s výskytem 0,08 %. Za podmínky, že oba spadají do stejné kategorie WTC, stejné kategorie přibližovací rychlosti, stejné kategorie pohonu, stejné kategorie rozpětí křídel, byly tyto dva letouny spojeny pod letoun B s výsledným výskytem 0,14 %.

Stejná metoda byla použita také u letounů se stejnými vlastnostmi, ale nízkým výskytem. To s cílem snížení zátěže simulačního programu na matematický výpočet.

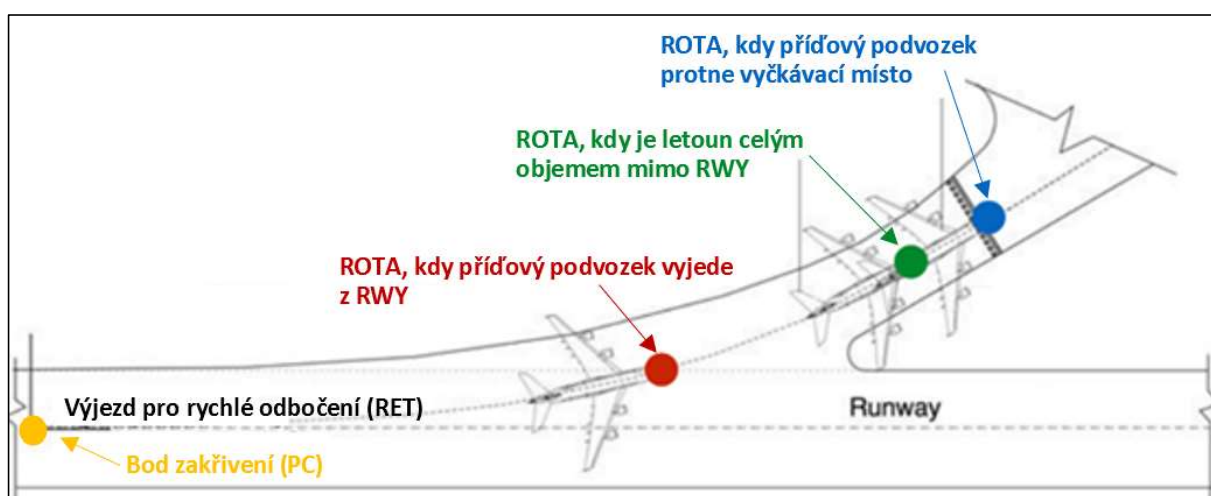
### Motivační faktor

Funkce tohoto faktoru byla detailně popsána a vysvětlena v kapitole 5.3. S cílem co nejvyšší přesnosti výstupů simulace byl experimentální metodou stanoven motivační faktor na hodnotě 0,9. Tato hodnota je důležitá v návrhové části práce, kdy je zkoumáno o kolik procent by letouny na novém výjezdu musely zvýšit svoji průměrnou hodnotu decelerace. Znamená to, že oproti defaultně nastavenému chování letadel byl simulovaný provoz zpomalen, resp. byla snížena jeho průměrná decelerace o 10 %.

Jedná se také o logickou změnu, jelikož je výjezd TWY G umístěn poměrně daleko od prahu dráhy. To na posádky neklade nároky na prudké zpomalení, naopak mohou zvolit menší hodnotu decelerace a plynule dráhu uvolnit na TWY G. Změna parametru je v souladu s použitím programu. Právě díky parametru motivačního faktoru, lze model kalibrovat tak, aby mohl být použit pro potřebu práce. [5]

## Způsob měření ROTA

Simulační model REDIM nabízí celkem tři možnosti, jak měřit dobu ROTA. Počátek měření je pokaždé stejný – jedná se o moment, kdy letoun přeletí práh dráhy. Lze však měnit dobu ROTA podle toho, kdy je měření ukončeno. Vysvětlení je znázorněno na obrázku č. 15. První možností je okamžik, kdy se předový podvozek ocitne mimo RWY – červený bod na obrázku. Druhou, a také zde zvolenou možností, je moment, kdy poslední část letounu opustí prostor nad RWY – zelený bod. Třetím scénářem je bod, kdy letoun předovým podvozkem dosáhne vyčkávacího místa na použitém výjezdu – modrý bod. [5]



Obrázek 15: Způsoby měření ROTA v simulaci (vytvořeno pomocí [5])

Správné nastavení simulačního modelu je zásadním momentem výzkumu. Je prvním předpokladem k úspěšné validaci simulace, a tedy následnému použití modelu v praktické části práce. Simulační model REDIM byl nastaven v návaznosti na zjištěné parametry dráhy 30, tvar a pozice přilehlých výjezdů, údajů získaných z reálného provozu i statistických hodnot vnějších podmínek. Dalším krokem je tzv. validace modelu, která je klíčovým krokem k použití simulace pro návrh pozice nového výjezdu pro rychlé odbočení z dráhy 30.

## 7 Validace simulačního modelu

Pod pojmem validace rozumíme vyvození závěru, zda vytvořený simulační model vykazuje uspokojivou míru shody s reálným provozem, a to v souladu se zamýšleným použitím modelu. Ověření shody modelu s realitou bývá nejnáročnější fází při modelování jakékoliv simulace. Je nutné prokázat dostatečnou míru shody s reálnými neboli referenčními daty, aby byly výsledky a závěry vyvozené z návrhové části práce validní. [30]

### 7.1 Postup validace a referenčních data

Analýza provozu prokázala, že kategorie MEDIUM JET představuje většinové zastoupení v provozu. Po konzultaci s Letištěm Praha byl právě tento užší výběr provozu použit jako referenční. Sledován byl tedy provoz kategorie MEDIUM JET, a to v období uzavírky hlavní dráhy v roce 2022, tedy od 28.3.2022 do 31.6.2022. [25] [27]

V rámci validace simulačního modelu byly vybrány a testovány dva parametry.

- ROTA – doba, kterou letadlo strávilo na dráze 30 při přistání.
- Distribuce provozu na výjezdech, tedy kolik procent letadel použilo daný výjezd.

Celá validace je založená na zkoumání třech částí. První část řeší charakteristiku provozu na výjezdu TWY G. Ten byl vybrán, jelikož na něm bylo zaznamenáno největší množství provozu. Navrhovaný nový výjezd z dráhy 30 by měl být navíc umístěn před TWY G. Proto je klíčové, aby zde letouny v simulaci vykazaly co nejpřesnější chování jako ve skutečnosti. Druhá část zkoumá distribuci letadel na jednotlivých výjezdech, tedy jaká část provozu využila pro uvolnění dráhy daný výjezd. Poslední část validace pak řeší porovnání celkové průměrné doby ROTA v simulaci a v reálném provozu. Na závěr je provedeno shrnutí validační části s uvedením všech získaných hodnot.

Celý postup validace simulačního modelu byl konzultován s Ústavem aplikované matematiky na Fakultě dopravní ČVUT.

### 7.2 Validace ROTA na TWY G

První část prokázání důvěryhodného chování modelu je porovnání časů ROTA na výjezdu TWY G v simulaci a v reálném provozu. Data jsou tedy tvořena souborem naměřených časů ROTA. Pro účely validace bylo zvoleno porovnání dvou statistických hodnot dat, a to:

- Středních hodnot
- Rozptylů

## Shoda středních hodnot

Střední hodnota je ekvivalentem aritmetického průměru a značí se  $\mu$ . Vypočítá se jako suma sledovaného parametru (zde ROTA), dělená počtem hodnot. Shodnost středních hodnot nám tedy dává informaci, zda jsou střední hodnoty dvou souborů stejné. Toto porovnání však nezahrnuje rozdělení dat v souboru neboli variabilitu dat. [31]

## Shoda rozptylů

Rozptyl se značí  $\sigma^2$  a je jedním z hlavních ukazatelů variability dat. Poskytuje nám informaci o tom, jak jsou data rozdělena kolem střední hodnoty. Shodnost v rozptylu je klíčová pro stanovení tvrzení o stejném chování letadel v simulaci a ve skutečnosti. [31]

### 7.2.1 Volba validačního nástroje a popis validace

Pro potřebu ověření spolehlivosti modelu na shodu středních hodnot a rozptylů, byla použita statistická nadstavba programu MATLAB, jež je pro validace hojně využíván. Nástroj disponuje několika možnostmi statistických funkcí, které slouží k testování statistických hypotéz. [33]

Než bude provedeno srovnání simulovaných a reálných dat, je nutné se seznámit se základními pojmy testování hypotéz. Pod hypotézou si můžeme představit určité tvrzení nebo scénář, který chceme prokázat či negovat. Základní princip testování hypotéz lze shrnout tímto způsobem:

*Pomocí testování statistických hypotéz rozhodujeme na základě informací získaných ze statistických testů, zda přijmeme či zamítneme určité tvrzení. [32]*

Z principu o potvrzení nebo vyvrácení tvrzení pak rozeznáme dvě základní hypotézy:

$H_0$  = nulová hypotéza

Zpravidla reprezentuje tvrzení, které chceme dokázat, tedy například, že rozptyl první sady dat je shodný s rozptylem sady dat druhé.

$$\sigma^2_1 = \sigma^2_2$$

$H_A$  = alternativní hypotéza

Je opačným tvrzením, než hypotéza nulová. V tomto případě by se jednalo o tvrzení, že rozptyl první sady dat není shodný s rozptylem sady dat druhé.

$$\sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$$

[32] [33]

To, jestli nulovou hypotézu zamítneme nebo ne, nám zjednodušeně řečeno určuje porovnání výsledku statistického testu s tzv. hodnotou hladiny významnosti, označovanou jako  $\alpha$ . Veličina vyjadřuje chybovou pravděpodobnost, že se zamítne nulová hypotéza, ačkoliv platí. Zanáší tedy do procesu validace jednotku přesnosti. Hladina významnosti byla nastavena na hodnotu  $\alpha=0,05$ , což odpovídá 95 % přesnosti stanoveného tvrzení. [32] [33]

Jestliže je  $p$  hodnota výsledku testu větší, než hladina významnosti  $\alpha$ , pak nemůžeme zamítnout nulovou hypotézu a tedy předpokládáme, že platí. Pokud je  $p$  hodnota výsledku testu menší, než je hladina významnosti, pak zamítáme nulovou hypotézu. Pravidla jsou shrnuta v tabulce č. 10. [32] [33]

*Tabulka 10: Pravidla pro určení výsledku statistického testu (vytvořeno pomocí [32])*

Výsledek testu	Tvrzení
$p < \alpha$	Zamítáme $H_0$
$p > \alpha$	Nezamítáme $H_0$

## 7.2.2 Výběr statistických testů

Jak již bylo zmíněno v přechozí kapitole, tak pro účely validace budou provedeny dva testy. První test na shodu rozptylů skutečně naměřených hodnot z provozu a hodnot ze simulace. Druhý test na shodu středních hodnot rovněž pro reálný provoz a simulaci.

Při výběru statistických testů se musíme řídit několika kritérii, které předurčují vhodnost použití daného testu. Každý test má svá specifika a jeho použití na chybně charakterizovaných datech by nemuselo poskytnout validní výsledek. [33]

Testem zvoleným pro shodu rozptylů je  $vartest2$ . Jedná se o test pro dva výběry, což je případ této validace – první výběr jsou data z reálného provozu a druhý ze simulace. [33]

Druhý test posuzující shodnost dvou středních hodnot je  $ttest2$ . Jedná se opět o dvouvýběrový test pro tzv. nepárová data. (nepárová, jelikož reálná data versus simulace nejsou na sebe napárovány). [33]

Oba testy patří mezi parametrické, což znamená, že počítají s normálním rozdělením dat. (v praxi se také používá Gaussovo rozdělení). Aby bylo možné použít testy o shodě rozptylů a středních hodnot, je třeba prokázat normalitu dat. První možností, jak ji prokázat, je použití tzv. Andersonova-Darling testu neboli  $adtestu$ . [33]



## ADTEST NORMÁLNÍHO ROZDĚLENÍ DAT

Z balíčku statistických testů byl tedy vybrán adtest, který na výstupu vrací p hodnotu, podle které určíme, jestli data mají normální rozdělení s hladinou významnosti 0,05.

$H_0$  = nulová hypotéza – data pocházejí z normálního rozdělení

$H_A$  = alternativní hypotéza – data nepocházejí z normálního rozdělení

Výsledkem obou testů (první test byl proveden pro data z reálného provozu a druhý pro data ze simulace) byla hodnota 0,00005. Výsledek je menší než stanovená hladina významnosti 0,05. Z toho vyplývá, že zamítáme nulovou hypotézu o normálním rozdělení dat. Druhou možností, jak zajistit normalitu je přes tzv. centrální limitní větu. [33] [34]

### Centrální limitní věta

Zjednodušeně lze centrální limitní větu interpretovat tak, že pokud mají data, kde  $N$  je počet dat, normální rozdělení, pak je i rozdělení průměru pozorovaných hodnot normální. Pokud však není rozdělení dat normální (což je tento případ, jelikož nevyšel test na normalitu), pak je rozdělení průměru pozorovaných hodnot přibližně normální. To za podmínky, že  $N$  je dostatečně velké. Počet dat by měl být větší než 100. [34]

Z definice vyplývá, že pro velký balíček dat je možné normalitu zajistit právě díky velkému počtu dat. Data z reálného provozu obsahují celkem 8 288 přistání a simulace dohromady 57 621 přistání. Na základě centrální limitní věty a konzultace procesu validace s Ústavem aplikované matematiky byla stanovena normalita dat.

### 7.2.3 Referenční data

Ve sledovaném období rekonstrukce hlavní dráhy bylo na RWY 30, za podmínky využití výjezdu TWY G, zaznamenáno celkem 8 288 přistání. Průměrná hodnota doby ROTA při využití TWY G činila 58,445 vteřin, se směrodatnou odchylkou 6,78 vteřin a rozptylem 45,962. Souhrnný přehled statistiky referenčních dat je uveden v tabulce 11 níže.

Tabulka 11: Statistika referenčních dat z provozu na TWY G (vytvořeno pomocí [25])

Statistická veličina	Hodnota veličiny
Střední hodnota	58,445
Chyba střední hodnoty	0,074
Medián	58
Směrodatná odchylka	6,78
Rozptyl výběru	45,962
Počet dat	8288

Data samotná jsou pak souborem naměřených časů ROTA pro letouny v kategorii MEDIUM JET na RWY 30 ve sledovaném období.

#### 7.2.4 Data ze simulace

Simulační model REDIM, byl na základě analýzy dat nastaven dle hodnot uvedených v kapitole č. 6. V simulaci bylo na výjezd TWY G provedeno celkem 57 621 přistání se střední hodnotou 58,527 vteřin a rozptylem 46,215. Souhrn statistických hodnot simulovaných dat je uveden v tabulce č. 12 níže. Data jsou tvořena souborem časů ROTA, které jsou výsledkem simulace.

Tabulka 12: Statistika simulovaných dat z provozu na TWY G (vytvořeno pomocí modelu REDIM)

Statistická veličina	Hodnota veličiny
Střední hodnota	58,527
Chyba stř. hodnoty	0,028
Medián	57,739
Směr. Odchylka	6,798
Rozptyl výběru	46,215
Počet dat	57 621

#### 7.2.5 Výsledky validace ROTA na TWY G

Za pomoci programu MATLAB byl vytvořen program ověřující shodu rozptylů a shodu středních hodnot. Vstupními parametry do programu byly dvě tabulky změřených hodnot časů ROTA z reálného a simulovaného provozu.

#### Test na shodnost rozptylů

Nejprve byl proveden test na shodnost rozptylů (vartest2) s hladinou významnosti  $\alpha=0,05$ .

Stanovení hypotéz:

$H_0$  = nulová hypotéza – data mají shodný rozptyl

$H_A$  = alternativní hypotéza – data nemají stejný rozptyl

Výsledkem testu je hodnota  $p_{VAR}= 0,7445$ .

Hodnota  $p_{VAR}$  vyšla větší než hladina významnosti  $\alpha$ . Z tohoto porovnání je možné stanovit závěr, že nezamítáme nulovou hypotézu o shodnosti rozptylů. Test na shodu rozptylů dat reálného provozu a provozu v simulaci vyšel, a to na hladině významnosti 0,05. [33]

## Test na shodnost středních hodnot

Po dosažení shodnosti rozptylu byl proveden vartest2 na shodnost středních hodnot na hladině významnosti  $\alpha=0,05$ . [34]

Stanovení hypotéz:

$H_0$  = nulová hypotéza – data mají shodnou střední hodnotu

$H_A$  = alternativní hypotéza – data nemají shodnou střední hodnotu

Výsledkem testu je hodnota  $p_{pSH}= 0,3026$ .

Hodnota  $p_{pSH}$  vyšla větší než hladina významnosti  $\alpha$ . Z tohoto srovnání je možné stanovit závěr, že nezamítáme nulovou hypotézu o shodnosti středních hodnot. Test na shodu střední hodnoty dat reálného provozu a provozu v simulaci vyšel na hladině významnosti  $\alpha=0,05$ . [33]

### 7.2.6 Závěr validace ROTA na TWY G

Byla provedena validace času ROTA mezi hodnotami ze skutečného provozu a simulace. Na základě pozitivních výsledků testu na shodu středních hodnot a testu na shodu rozptylů lze na hladině významnosti  $\alpha=0,05$  prohlásit, že je model z pohledu simulace času ROTA na TWY G validní. Souhrnný přehled všech hodnot je uveden v tabulce č. 13. [33]

Tabulka 13: Výsledky validace doby ROTA na TWY G

Veličina	Realná data	Data ze simulace	Rozdíl
Alfa	0,005		
Rozptyl	45,962	46,215	-0,253
Phodnota ROZPTYL	0,7445		0,745
Výsledek	Nezamítáme $H_0$		
Střední hodnota [s]	58,445	58,527	-0,082
Phodnota STŘ. HODN.	0,3026		
Výsledek	Nezamítáme $H_0$		

## 7.3 Validace využití výjezdů

V reálném provozu používá konkrétní výjezd z dráhy pouze určitá část přistávajících letadel. V simulačním modelu je tedy kromě shodnosti průměrné doby ROTA nutné zajistit, pokud možno co nejpřesnější procentuální zastoupení provozu na takovém výjezdu.

### 7.3.1 Referenční data

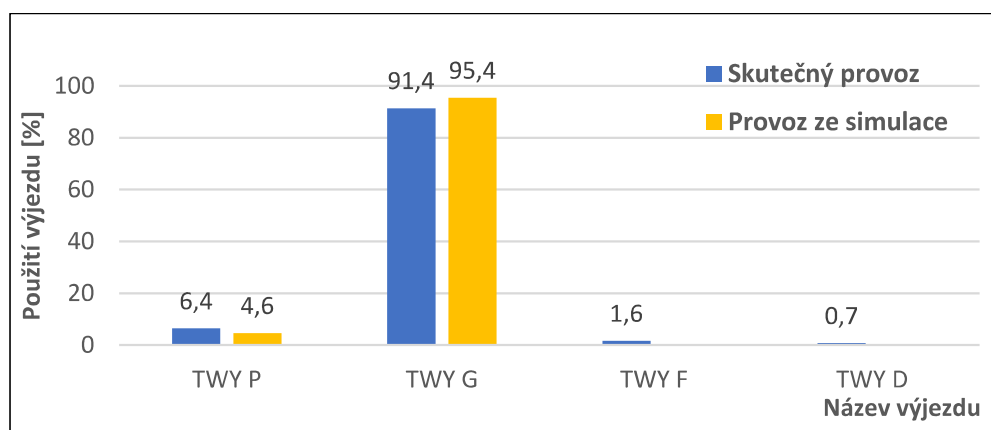
Pro referenční hodnoty byl opět použit balíček dat z období údržby hlavní dráhy v roce 2022. V tomto období nás zajímá pouze provoz v kategorii MEDIUM JET a jeho rozmístění na jednotlivých výjezdech z RWY 30. Jedná se tedy o stejný graf, který byl získán z podrobné analýzy provozu v kapitole 4.2.4. Graficky jsou hodnoty zobrazeny modře v grafu na obrázku č. 16 níže.

### 7.3.2 Simulace

S ohledem na procentuální využití výjezdů v reálném provozu, které prokázalo, že výjezdy TWY F a TWY D byly použity minimálně, bylo rozhodnuto o použití pouze výjezdů TWY G a TWY P v simulaci. [25]

Toto nastavení simulačního modelu bylo konzultováno s vývojáři programu a je jediným možným řešením při zachování co nejvyšší přesnosti modelu. Pro účely simulace bylo tedy použito posledních dvou výjezdů z dráhy, tedy TWY F a TWY D zanedbáno. Je však třeba mít tento krok na paměti a zohlednit jej ve finálních výsledcích práce.

V simulaci využilo výjezd TWY G 95,4 % letadel. Dřívější výjezd TWY P byl použit ve 4,6 % provozu a zbylé dva výjezdy mají nulové zastoupení. Vše je vidět na obrázku č. 16, které rovněž zobrazuje srovnání s reálnými (referenčními) daty, které jsou zobrazeny modře.



Obrázek 16: Graf distribuce provozu v simulaci (vytvořeno pomocí [25] a modelu REDIM)

### 7.3.3 Validace a výsledek

Ověření, zda je model validní při distribuci provozu na jednotlivých výjezdech, bylo provedeno porovnáním reálných a simulovaných hodnot. V případě TWY P simulace spočítala o 1,8 % méně provozu, než ve skutečnosti a u TWY G se jednalo o 4 % více. Model také nesimuloval žádný provoz na poslední dva výjezdy, což představuje chybu 1,6 % u TWY F a 0,7 % u TWY D. Průměrná chyba tedy činila 2,05 %.

Pro závěr však byla vybrána nejvyšší naměřená odchylka, tedy 4 % a od ní vyvozená konečná chyba modelu. Celková chyba simulace pro distribuci provozu na jednotlivých výjezdech z dráhy 30 byla stanovena na hodnotu  $\pm 4 \%$ .

## **7.4 Validace celkové průměrné doby ROTA**

Nejdůležitější hodnotou sledovanou v rámci praktické části diplomové práce je celková průměrná doba ROTA. Poskytuje informaci o tom, kolik času v průměru letouny tráví na dráze při možnosti použití všech výjezdů.

Bylo zjištěno, že během sledovaného období nabyla průměrná doba ROTA pro kategorii MEDIUM JET hodnoty 58,249 vteřin. Letouny v simulaci vykázaly průměrný čas ROTA 57,010 sekund. Rozdíl průměrných hodnot tak činil 0,239 vteřin. Letouny v simulaci tak byly v průměru o 0,239 sekund rychlejší při použití všech výjezdů. Byla stanovena chyba simulace  $\pm 0,25$  vteřin.

## **7.5 Závěr validace**

Ohodnocení, zda je simulační model validní pro další použití bylo provedeno na základě sledování dvou parametrů – čas ROTA a distribuce provozu na jednotlivých výjezdech.

Na základě pozitivního výsledku dvou statistických testů, bylo v první části validace zjištěno, že simulační model je schopen simulovat provoz na TWY G, se shodnou střední hodnotou a shodným rozptylem na hladině významnosti  $\alpha=0,05$

Druhá část validace řešila distribuci letounů na výjezdech z RWY 30. Simulační model zde vykázal maximální chybu 4 %.

Ve třetí části byly srovnány průměrné časy ROTA za možnosti využití všech výjezdů. Porovnáním průměrného času ze simulace a průměrného času z reálného provozu vyšla průměrná chyba 0,239 sekund.

Na základě předešlé validace bylo stanoveno, že model simuluje provoz s přesností  $\pm 0,25$  vteřin času ROTA a s přesností  $\pm 4 \%$  v distribuci provozu na výjezdech

Model byl s ohledem na pozitivní výsledek statistických testů a nízkou hodnotu chyby distribuce uznán jako validní pro následnou simulaci a návrh nového výjezdu z RWY 30. Jisté omezení představuje vyřazení posledních dvou výjezdů TWY F a TWY D ze simulace. V návrhové části práce je nutné dbát na tento fakt ohled a vzít jej v potaz při stanovení finálních výsledků diplomové práce.

## 8 Návrh RET

V této části diplomové práce je proveden již samotný návrh nového výjezdu pro rychlé odbočení z dráhy 30. V rámci praktické části jsou provedeny dvě varianty návrhu nové RET, které jsou blíže rozebrány, a to včetně uvedení chování provozu na takto navržených výjezdech. Obě varianty jsou vlastním návrhem autora diplomové práce. První varianta vychází jak z dosavadní znalosti problematiky výstavby RET, tak z požadavků ze strany Letiště Praha. Druhá varianta řešení vychází ze simulačního modelu REDIM. Ten dokáže jednak simulovat provoz na stávající infrastruktuře, ale také navrhnout vhodnou pozici nové RET. Oba návrhy jsou zakresleny do situace LKPR s již vybudovaným projektem Centrálního odmrazovacího stání. K výkresu byl použit program AUTOCAD včetně jeho nadstavby pro design letišť AviPlan. V kapitole jsou nejprve popsány návrhové parametry, které jsou pro obě varianty řešení stejné, a poté je každý návrh detailně rozebrán.

### 8.1 Tvar RET

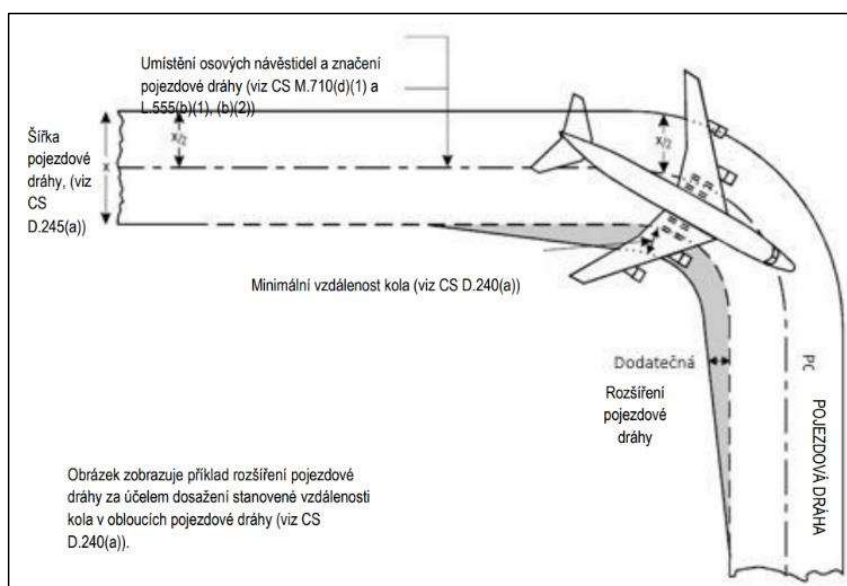
Metodika návrhu i jednotlivé požadavky jsou blíže specifikovány v několika příručkách. Hlavním zdrojem pro návrh RET v této práci byl dokument ICAO Aerodrome Design Manual (Doc 9157), Part 2 [11] a dokument CS-ADR-DSN pro návrh letišť [12]. Podrobný popis designu výjezdu, včetně nákrešů a volby jednotlivých parametrů, je uveden v následujících podkapitolách.

#### 8.1.1 Rozměry pojezdové dráhy

Výjezd pro rychlé odbočení je speciálním typem pojezdové dráhy. Část návrhu RET se tedy řídí metodikou návrhu klasické TWY. Nejprve je tedy nutné navrhnout rozměry, hlavně šířku a přesné umístění osového značení výjezdu. [11] [12]

Hlavním parametrem je šířka pojezdové dráhy, která se řídí vnějším rozchodem kol hlavního podvozku letadla. Obecně by provedení pojezdové dráhy mělo být takové, aby vzdálenost mezi vnějším kolem hlavního podvozku letounu a okrajem pojezdové dráhy nebyla menší než 4 m (zvoleno dle tabulky v metodice pro návrh TWY). V rovném úseku by pak šířka pojezdové dráhy neměla být nižší než 23 m. Při návrhu nového výjezdu z RWY 30 byla použita hodnota šířky 23 m. Tato šířka by však v oblouku nestačila, a proto je nutné provést tzv. rozšíření TWY v oblouku. Vysvětlení tohoto rozšíření je vidět na obrázku č. 17 na další straně. Stále musí být splněna podmínka, že vnější kolo hlavního podvozku musí být minimálně 4 m od okraje pojezdové dráhy. [11] [12]

V případě RET je pak žádoucí volit dostatečný poloměr vnitřní strany výjezdu k zajištění rozšíření pojezdové dráhy, a to za účelem usnadnění včasného zjištění výjezdu a odbočení na pojezdovou dráhu. [12]



Obrázek 17: Rozšíření TWY v oblouku [12]

Po celé délce pojezdové dráhy musí být také splněny hodnoty různých minimálních vzdáleností. Pro tento případ je nejdůležitější hodnota, která určuje, že mezi osou pojezdové dráhy a jakýmkoliv jiným objektem musí být minimální vzdálenost 43,5 m.

Posledním parametrem, co se šířky výjezdu týče, je rozměr tzv. postranního pásu pojezdové dráhy. Podle kategorie E, do které Letiště Václava Havla Praha spadá, by měla být minimální šířka pásu pojezdové dráhy v rovném úseku 38 m. Tato hodnota byla zvolena i při návrhu RET z dráhy 30. V obloucích pojezdových drah a na křižení, kde je zřízena rozšířená vozovka, by šířka postranních pásů neměla být menší než šířka na přilehlých přímých částech pojezdové dráhy. [12]

Shrnutí všech výše uvedených rozměrů je uvedeno v tabulce č. 14 níže.

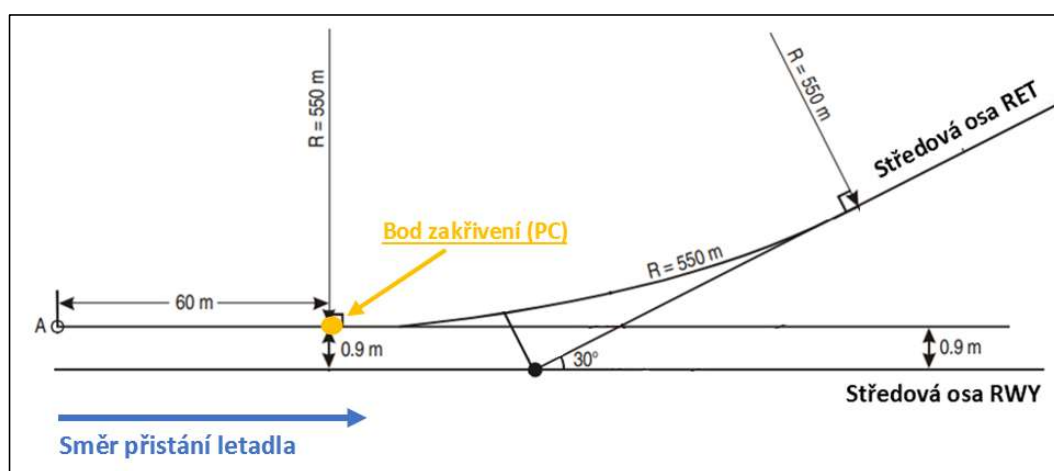
Tabulka 14: Základní rozměry RET (vytvořeno pomocí [12])

Rozměr	[m]
Šířka pojezdové dráhy v přímém úseku	23
Minimální vzdálenost kola vnějšího podvozku od okraje TWY	4
Minimální vzdálenost osy TWY od jakéhokoliv objektu	43,5
Šířka pásu pojezdové dráhy	38

## 8.1.2 Geometrie výjezdu

Hlavním kritériem při návrhu designu RET je kategorie letiště. V případě Letiště Václava Havla Praha se jedná o kategorii 4E, proto se design řídí druhým typem návrhu. [11] [17]

Dalším kritériem je pak úhel, který výjezd pro rychlé odbočení svírá s osou RWY. Úhel by neměl být menší než 25 stupňů a neměl by překročit hodnotu 45 stupňů. Doporučený úhel dle metodiky návrhu je pak 30 stupňů. Na základě tohoto doporučení i konzultace návrhu s Letištěm Praha byla zvolena hodnota 30 stupňů. Konkrétní geometrie, ze které bylo vycházeno při návrhu RET, je znázorněna na obrázku č.18. [11]



Obrázek 18: Geometrie výjezdu pro kategorii letiště 3-4 (vytvořeno pomocí [11])

Aby nedošlo k překrytí osového značení RWY je středové značení výjezdu od osy RWY posunutě o 0.9 m. Středové značení začíná 60 m od bodu PC (bod, kde rovná část přechází do obloukové části). Dále je značení vedeno obloukem o poloměru 550 m. Kružnicová část je ukončena v bodě, kde RET opět přechází do rovného úseku, který s osou RWY svírá úhel 30 stupňů. Na vnitřní straně výjezdu je upraven poloměr tak, aby mohly posádky registrovat blížící se výjezd s dostatečným předstihem. [11]

RET je využíván letadly, které mají při svém výjezdu ještě stále vysokou rychlost, podle metodiky ICAO byla stanovena referenční hodnota rychlosti 50 uzlů. Proto je vhodné, aby rovný úsek poskytl dostatečnou vzdálenost pro další zpomalení letadla. Pro letiště kategorie čtyři by rovný úsek měl být minimálně 75 m dlouhý. Nový výjezd RET je vhodné umístit tak, aby bylo zajištěné jeho dobré napojení na navazující systém pojezdových drah. Dle pokynů ze strany Letiště Praha by měla být snaha dodržet úhel 30 stupňů v co možná nejdelší části. Až v závěru rovného úseku lze směr středového značení upravit tak, aby byl plynule napojen na navazující pojezdové dráhy. [9] [11]

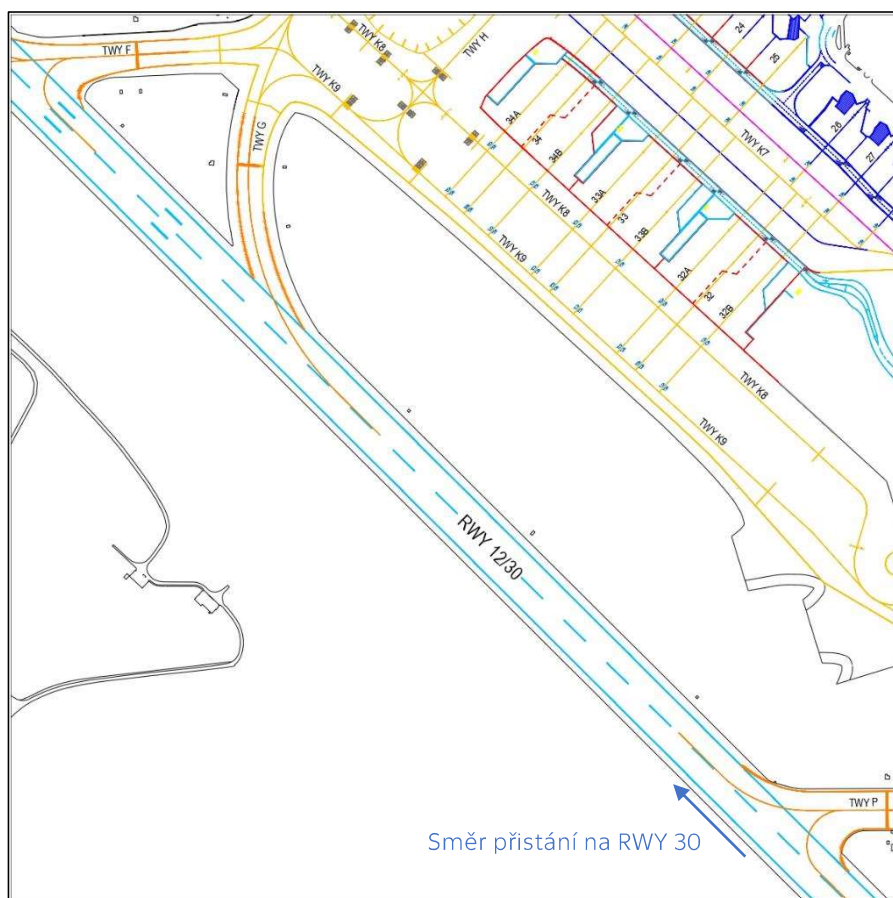


## 8.2 Požadavky při návrhu pozice RET

Posledním a nejdůležitějším parametrem RET je jeho umístění vůči prahu dráhy. Dle odborné literatury je doporučenou metodou pro určení pozice RET z dráhy počítačová simulace založená na přesných datech chování letadel. [10] [12]

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, v praktické části práce jsou vytvořeny dva návrhy RET z dráhy 30. Pozice výjezdu v druhé variantě řešení vychází z programu REDIM. Umístění výjezdu v prvním návrhu reflektuje jednak dosavadní znalost problematiky umístění RET, ale také požadavky ze strany Letiště Praha.

Prvním z požadavků je snaha docílit snížení průměrné doby ROTA pod 50 vteřin, což je spojené s možností aplikace snížených rozstupů. Přejít na tuto proceduru není primárním ani aktuálním cílem Letiště Praha. Pokud se však již zabýváme RET z dráhy 30, pak je vhodné, aby návrh zohlednil tyto postupy a do budoucna neznemožnil jejich použití. Dalším požadavkem je umístit RET s ohledem na plánovaný projekt Centrálního odmrazovacího stání (dále také COS). Proto budou oba návrhy výjezdu zakresleny do situace zobrazené na obrázku č.19. Na něm je patrná současná situace RWY 12/30, projekt COS a umístění nově vzniklých pojezdových drah spojených s výstavbou COS. [9]



Obrázek 19: Situace pro zakreslení návrhu RET (vytvořeno pomocí [19])

## 8.3 Varianta č. 1

První varianta vychází z dosud známých poznatků o návrhu pozice RET pro letouny v kategorii MEDIUM JET a z požadavků od Letiště Praha. Umístění výjezdu je vlastním návrhem autora diplomové práce.

Dle dostupné literatury, dosavadních zkušeností i studie od Eurocontrolu je doporučená pozice výjezdu pro kategorii MEDIUM JET v rozmezí 1500–1800 m od prahu dráhy. Při návrhu byl určitou inspirací projekt RET Y z dráhy 24, který je podrobněji popsán v kapitole 3.4.1. V rámci něj se počítá s umístěním nového výjezdu pro rychlé odbočení z RWY 24 do vzdálenosti 1 685 m od prahu dráhy. Bylo zjištěno, že tato pozice je z hlediska maximální propustnosti dráhy pro letouny kategorie MEDIUM JET ideální. Proto se první varianta návrhu inspirovuje tímto projektem. [20]

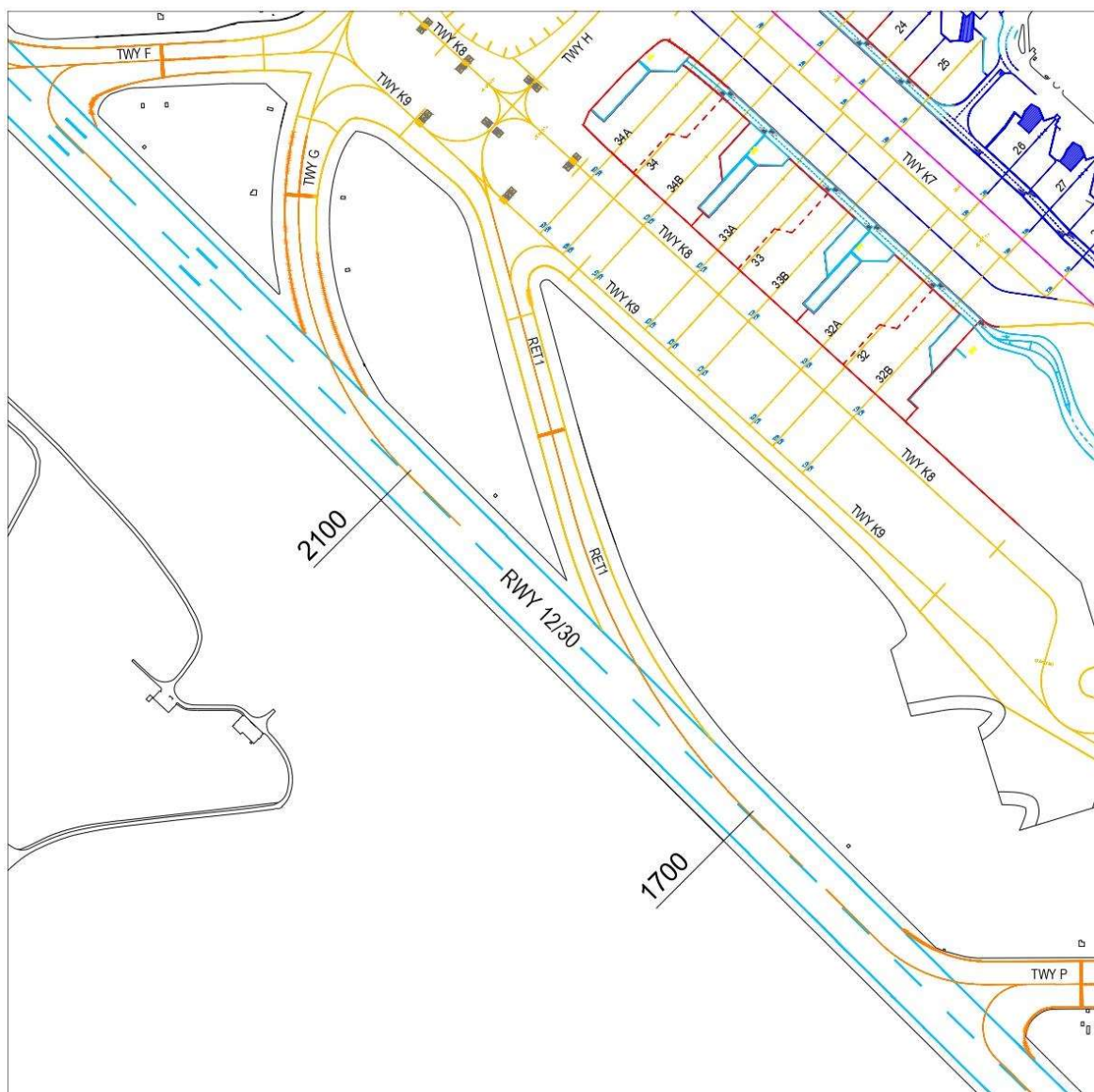
Snahou vlastního návrhu umístění RET je vyhovět následujícím požadavkům:

- snížit průměrnou dobu ROTA pod 50 vteřin
- docílit co možná nejvyššího využití RET
- plynulé napojení na navazující pojezdový systém v rámci projektu COS
- umístění RET v rozpětí 1650-1750 m od prahu dráhy

### 8.3.1 Zakreslení varianty č. 1

V rámci prvního návrhu bylo v simulačním modelu vytvořeno několik scénářů. Pozice výjezdů byla volena v rozpětí 1650–1750 m od prahu dráhy. Toto rozmezí vychází z konzultací s Letištěm Praha. Sledovány byly dva parametry. Průměrný čas ROTA a procento provozu, které by nový výjezd pro rychlé odbočení využilo. Snahou bylo najít kompromis mezi co nejnižší průměrnou dobou ROTA a co nejvyšším poměrem využití nové RET. Výsledkem je umístění dále také označované jako varianta č. 1. Ta počítá s polohou RET ve vzdálenosti 1700 m od prahu dráhy 30.

Středová osa RET je tvořena rovnou částí v délce 60 m, obloukem o poloměru 550 m a pak následuje rovný úsek o délce 190 m pod úhlem 30 stupňů. Poté je nový výjezd pro rychlé odbočení napojen na navazující infrastrukturu pojezdových drah. Posádky tak mohou po přistání odbočit doprava nebo doleva na TWY K9. Rovná část, která posléze rovněž přechází do pravého oblouku, pak napojuje výjezd pro rychlé odbočení na TWY H, jak je vidět na obrázku č. 20 na další straně.



Obrázek 20: Zákres varianty č. 1 (vytvořeno pomocí [19])

### 8.3.2 Chování provozu

Bylo zjištěno, že při stejném nastavení simulačního modelu jako ve validaci (tzn. motivační faktor= 0,9) nelze vyhotovit scénář, který by umožnil snížení průměrné doby ROTA pod 50 sekund. Celková průměrná ROTA by v tomto případě činila 52,347 vteřin a nový výjezd by byl využit 52,6 % provozu kategorie MEDIUM JET. Proto bylo následně provedeno zkoumání chování provozu v závislosti na změně motivačního faktoru letadel v simulaci.

### 8.3.3 Změna motivačního faktoru

Dle očekávání model tímto zásahem do průběhu simulace zvýšil motivaci všem letounům uvolnit dráhu pomocí dřívějšího výjezdu. To s sebou neslo nežádoucí efekt, kdy model zvýšil počet letounů, které využily pro svůj výjezd z dráhy TWY P. Ten je ale

ve skutečnosti s ohledem na svoji pozici a tvar využíván pouze letouny, jejichž stojánka se nachází v areálu Jih. Model by tak na tento výjezd simuloval i typy letadel, které by pak pojížděly do areálu Sever. Takové chování letadel je jednak nelogické, jelikož by si tím letouny značně prodloužily dobu pojíždění, ale je hlavně z provozních důvodů nemožné. Navíc by tyto letouny měly vliv na celkový průměr času ROTA a byla by tak zásadně ovlivněna přesnost výsledků práce. Simulační model bohužel neumožňuje zakázat konkrétní výjezd určitému typu letadel. Aby bylo možné zvýšit motivační faktor v simulaci za současného zachování realistického chování letadel, byl použit následující postup.

Byla provedena simulace se shodným nastavením všech parametrů jako ve validaci, navíc s přidaným novým výjezdem pro rychlé odbočení ve vzdálenosti 1 700 m od začátku dráhy. Ze simulovaného provozu byla vybrána jeho užší část, která v simulaci využila pro výjezd z dráhy TWY P. Užší výběr provozu tedy zahrnuje provoz s motivačním faktorem 0,9, který pro svůj výjezd zvolil TWY P. Zbylý provoz je označen jako druhá skladba provozu a odpovídá letadlům, která pro svůj výjezd nevyužila výjezd TWY P.

Poté bylo na variantě č. 1 vyhotoveno několik simulací se zvýšeným motivačním faktorem, pouze za použití druhé skladby provozu, která tedy nevyužila TWY P pro svůj výjezd. Provoz na výjezdu TWY P zůstal konstantní, nemění se jak jeho složení, tak průměrná hodnota ROTA. Tím bylo zajištěno, že simulace bude poskytovat validní výsledky korespondující se specifikacemi chování letadel na LKPR.

Výsledkem série simulací v první variantě návrhu je tabulka č. 15. Tabulka poskytuje přehled o tom, jak se v simulaci měnila celková průměrná doba ROTA a distribuce provozu na jednotlivých výjezdech. To vše v závislosti na hodnotě motivačního faktoru, který postupně roste od hodnoty 0,9 (nastavení dle validace) až do hodnoty 1,2. Horní limit je dán doporučeným rozmezím dle příručky programu. Další zvyšování motivačního faktoru by již mohlo být spojené s nekomfortem cestujících při brždění na dráze nebo například s vyšším opotřebením brzd. Proto byl stanoven horní limit 1,2. [5]

*Tabulka 15: Změna motivačního faktoru na variantě č. 1 (vytvořeno pomocí modelu REDIM)*

Motivační faktor	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2
<b>Celková průměrná ROTA [s]</b>	52,347	51,601	50,950	50,432	50,001	49,704	49,429
<b>Použití výjezdu [%]</b>	<b>TWYP</b>	4,6 %	4,6 %	4,6 %	4,6 %	4,6 %	4,6 %
	<b>RET_1</b>	52,6 %	60,5 %	67,3 %	73,2 %	77,9 %	81,2 %
	<b>TWYG</b>	42,8 %	34,9 %	28,1 %	22,2 %	17,5 %	11,6 %

Výsledek tabulky potvrzuje vliv motivačního faktoru na chování letadel v simulaci. Je zřejmé, že se zvyšujícím se motivačním faktorem klesá celková průměrná doba ROTA a zároveň stoupá procentuální zastoupení letadel, které použily dřívější výjezd. Procento letadel, které využily k výjezdu z dráhy TWY P, zůstává konstantní, což koresponduje s použitou metodou popsanou výše. Simulační model sice chtěl výjezd TWY P umožnit stále se zvyšujícímu počtu letadel, nicméně takové chování je ve skutečném provozu nelogické, a navíc provozně nemožné. Sledována byla změna mezi výjezdem TWY G a nově navrženým výjezdem pro rychlé odbočení RET\_1 vzdáleným 1700 m od prahu dráhy. Dalším krokem bylo z výše uvedených možností simulace vybrat scénář, jež bude dále podrobněji vyhodnocen.

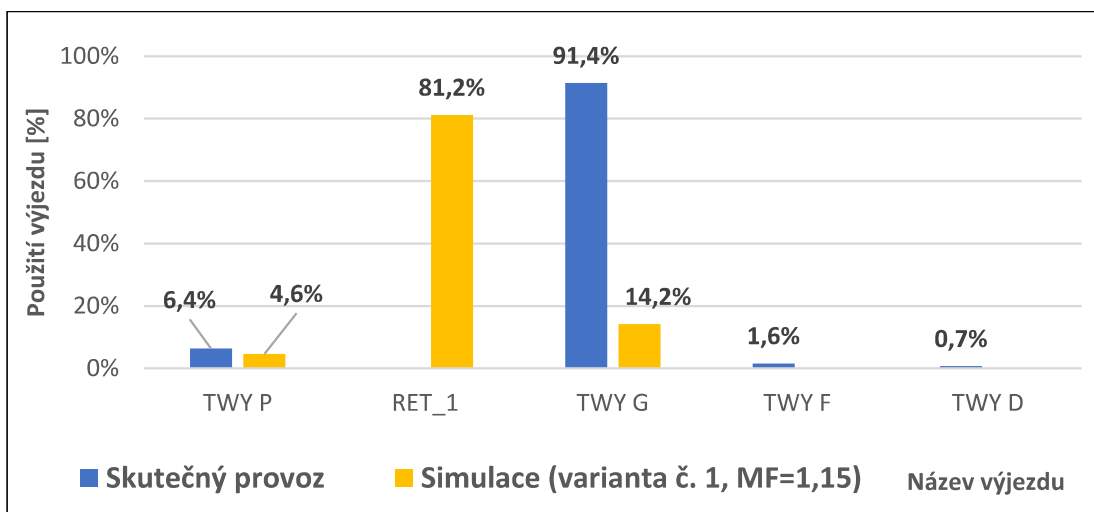
Aspektem při této volbě bylo kritérium snížení doby ROTA pod 50 vteřin, za co možná nejvyššího využití nového výjezdu pro rychlé odbočení. Zároveň bylo snahou zvolit možnost, kdy je motivační faktor co nejnižší. To proto, aby na posádky nebyl kladen zbytečně velký nárok na zvýšení hodnoty decelerace, a tudíž zvýšení opotřebení brzd atd. Z tabulky vyplývá, že pouze dva scénáře splnily předem definovaná kritéria. Jedná se o simulaci s motivačním faktorem 1,15 a 1,2. Oba vykázaly průměrnou hodnotu ROTA pod 50 vteřin. Cílem bylo pro další analýzu vybrat simulaci, kde bude provoz urychlen, pokud možno co nejméně, aby výsledky a závěr práce nekladly na posádky vyšší nároky, než je nutné. Zde je na místě také připomenout chybu simulace, která činí  $\pm 4\%$  v distribuci provozu na výjezdech a  $\pm 0,25$  vteřin v měření průměrné doby ROTA.

Proto byla zvolena simulace s motivačním faktorem na hodnotě 1,15. Tento scénář vyhovuje stanoveným požadavkům i po započtení chyby simulace. Podrobnější popis chování letadel při takto nastavené simulaci je proveden v následujících dvou podkapitolách. Je zde popsáno jak rozdělení provozu na výjezdech, tak konkrétní hodnoty časů ROTA a jejich porovnáním s daty ze reálného provozu.

#### **8.3.4 Distribuce provozu ve variantě č. 1**

Posunutím výjezdu do 1700 m a zvýšením motivačního faktoru na hodnotu 1,15 by byl nový RET\_1 využit v 81,2 % přistávajícího provozu v kategorii MEDIUM JET. Zbýlý provoz by využil stávající infrastrukturu výjezdů.

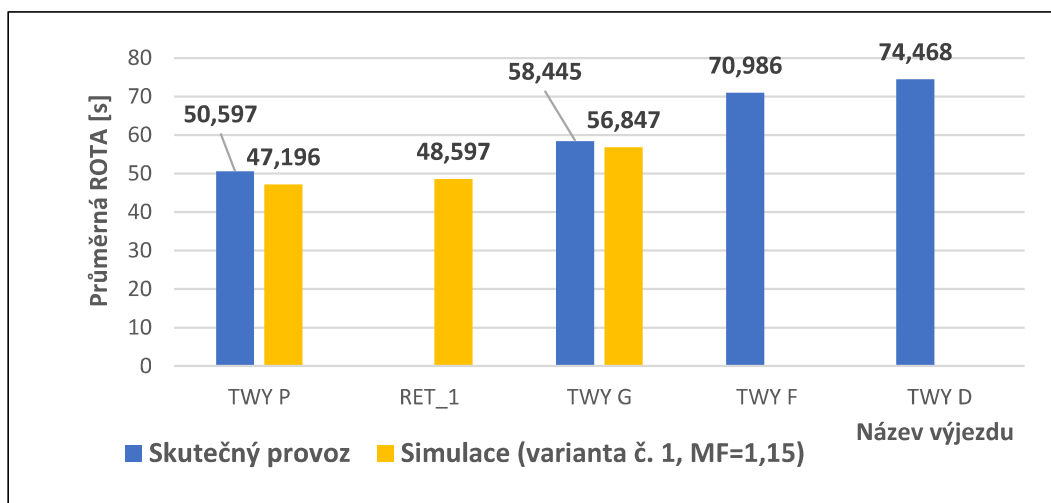
Toto rozdělení provozu na výjezdech je patrné grafu na obrázku č. 21. Modrá část odpovídá statistice ze skutečného provozu (data z roku 2022) a oranžová pak reprezentuje simulaci. Simulační model nepočítal s využitím posledních dvou výjezdů, proto na nich není provoz v simulaci zastoupený.



Obrázek 21: Graf distribuce provozu na variantě č. 1 (vytvořeno pomocí modelu REDIM a [25])

### 8.3.5 Porovnání ROTA

Při zvýšení motivačního faktoru na 1,15 a při posunutí nového výjezdu do pozice 1700 m byla na novém RET\_1 naměřena průměrná hodnota času ROTA 49,597 vteřin. Grafické znázornění průměrných časů na jednotlivých výjezdech je vidět v grafu na obrázku č. 22. Celková průměrná doba ROTA na všech výjezdech by pak byla 49,704 vteřin. Byl tak splněn požadavek snížit celkovou průměrnou dobu ROTA pod 50 vteřin.



Obrázek 22: Graf časů ROTA ve variantě č. 1 (vytvořeno pomocí modelu REDIM a [25])

## 8.4 Varianta č. 2

Umístění výjezdu v druhé variantě návrhu vychází ze simulačního modelu REDIM. Ten je schopen pomocí znalosti chování letadel navrhnout pozici nového výjezdu pro rychlé odbočení. Na základě vstupních parametrů uvedených v kapitole č. 6 navrhl model REDIM umístění nového výjezdu RET\_2 z dráhy 30 ve vzdálenosti 1800 m od prahu dráhy.

### 8.4.1 Zakreslení varianty č. 2

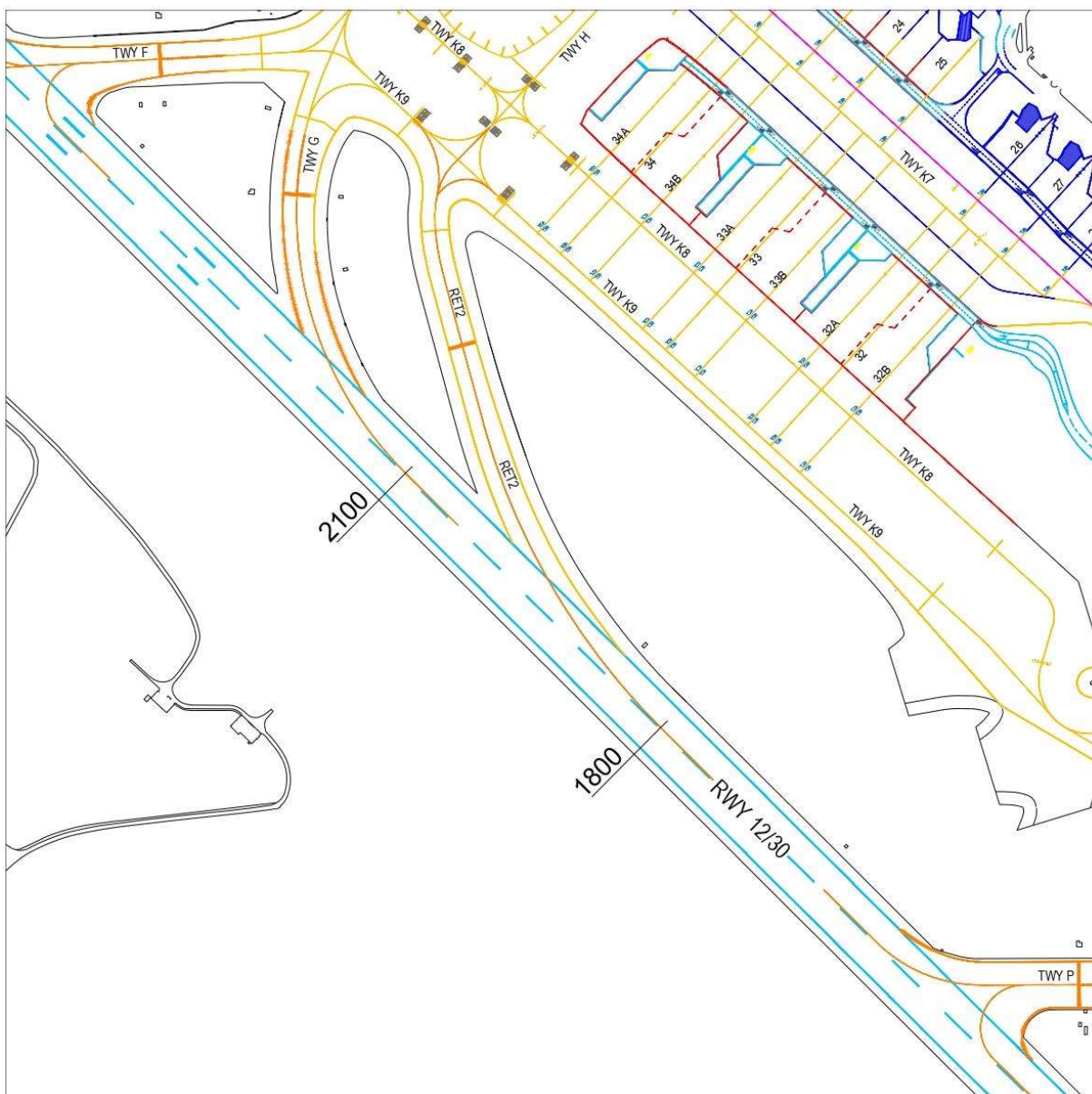
Geometrie i design výjezdu jsou stejné jako v první variantě návrhu. Jedná se tedy o RET pod úhlem 30 stupňů. Středová osa navrženého výjezdu je tvořena rovným úsekem o délce 60 m a poté obloukem o poloměru 550 m, který začíná v bodě 1800 m od prahu dráhy. Pak osa pokračuje v rovném úseku pod úhlem 30 stupňů ve vzdálenosti 121 m. Následně je středové značení napojeno obloukem na navazující pojezdový systém, konkrétně do křižovatky s TWY K9 a TWY H. Situace zakreslení druhé varianty návrhu je zobrazena na obrázku č. 23 na další straně.

### 8.4.2 Chování provozu

Při stejném nastavení simulace jako ve validaci tzn. vstupní parametry dle kapitoly č. 6 a motivační faktor na hodnotě 0,9 bylo zjištěno následující chování provozu.

Co se využití jednotlivých výjezdů týká, tak nový RET by byl využit v 71,5 % případů a letadla by na tomto výjezdu uvolnili dráhu průměrně za 51,535 sekund. Zbýlý provoz by využil TWY P (4,6 %), který se nezměnil a TWY G (23,9 %). Celková průměrná ROTA by pak v druhé variantě návrhu RET činila 52,552 vteřin.

Dle očekávání ani při této pozici výjezdu a stejném chování letadel jako ve validaci nedošlo ke snížení celkové průměrné doby ROTA pod 50 vteřin. Jedná se o logický závěr, jelikož druhá varianta počítá s umístěním RET o 100 m dále než varianta první, kde stejné chování také neprošlo požadavkem 50 vteřin. Dále je zkoumáno, jak by se měnilo chování provozu na druhé variantě návrhu při změně motivačního faktoru a zda by bylo možné vyhovět požadovanému snížení celkové průměrné doby ROTA.



Obrázek 23: Zákres varianty č. 2 (vytvořeno pomocí [19])

Pro tyto účely byl použit naprosto stejný postup jako v případě první varianty návrhu. Se zvětšeným motivačním faktorem měl simulační model opět snahu zvýšit počet letadel uvolňujících dráhu přes TWY P. Jak již bylo vysvětleno, toto chování je provozně nemožné i nelogické, a proto byl provoz na TWY P ponechán jako konstantní.

Výstupem zkoumání je tabulka č. 16 na další straně, která zobrazuje závislost hodnoty motivačního faktoru na celkové průměrné hodnotě ROTA a distribuci provozu na výjezdech ve druhé variantě návrhu. Z tabulky je patrná závislost, která již byla vysvětlena v první variantě návrhu. Zvyšující se motivační faktor snižuje celkovou průměrnou dobu ROTA. Důležitou informací získanou z této analýzy je, že ani v jednom případě nedošlo ke snížení celkové průměrné hodnoty ROTA pod 50 vteřin.



Tabulka 16: Změna motivačního faktoru na variantě č. 2 (vytvořeno pomocí modelu REDIM)

Motivační faktor	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2
<b>Celková průměrná ROTA [s]</b>	52,552	52,301	52,133	52,034	51,974	51,919	51,838
<b>Použití výjezdu [%]</b>	<b>TWYP</b>	4,6 %	4,6 %	4,6 %	4,6 %	4,6 %	4,6 %
	<b>RET_2</b>	71,5 %	77,0 %	81,6 %	85,3 %	88,1 %	89,9 %
	<b>TWYG</b>	23,9 %	18,4 %	13,8 %	10,1 %	7,3 %	5,5 %

## 8.5 Shrnutí a vyhodnocení variant

V rámci návrhu RET z dráhy 30 byly vytvořeny dvě varianty možného řešení. V obou případech je geometrie výjezdu totožná a vychází z manuálu pro návrh RET a z konzultací s Letištěm Praha. Výjezd je navržen pod úhlem 30 stupňů vůči ose dráhy a poloměrem oblouku 550 m.

První varianta řešení pozice RET je vlastní návrh autora diplomové práce. Zohledňuje dosavadní praxi z oblasti návrhu RET a také praktické požadavky ze strany Letiště Praha. V první variantě návrhu byl nový výjezd pro rychlé odbočení umístěn do pozice 1700 m od prahu dráhy. Druhá varianta řešení vychází ze simulačního modelu REDIM, který dokáže na základě znalosti chování letadel navrhnout pozici nové RET. Umístění výjezdu v druhé variantě je návrhem modelu, jež umístil RET do pozice 1800 m od prahu dráhy 30.

Bylo zjištěno, že při zachování stejného chování letadel jako ve validaci není možné vyhovět všem požadavkům návrhu, konkrétně snížit průměrnou dobu ROTA pod 50 sekund. Jedná se o logické zjištění, jelikož je současný výjezd TWY G umístěn poměrně daleko od začátku dráhy. Letouny tak používají nižší hodnotu zpomalení na dráze, aby byl jejich výjezd plynulý. Proto bylo dalším krokem zvyšování motivačního faktoru v simulaci a sledování výstupních hodnot chování provozu na obou variantách.

V druhé variantě řešení nebylo možné snížit průměrný čas ROTA pod 50 vteřin. Vzdálenost výjezdu navíc zcela nevyhovuje požadavkům ze strany Letiště Praha. Z těchto důvodů byla varianta č. 2 označena jako nevyhovující. V první variantě návrhu došlo k úspěšnému snížení průměrné doby ROTA, konkrétně na hodnotu 49,704 sekund, a to při nastavení motivačního faktoru na 1,15.

Jako výsledek návrhové části tak byla zvolena první varianta řešení, tedy umístění RET do vzdálenosti 1700 m od prahu dráhy 30.

## 8.6 Vliv RET na propustnost RWY 30

Nový výjezd pro rychlé odbočení z dráhy 30 by měl vliv pouze na přistávající provoz, který by tak snížil svůj průměrný čas strávený na dráze. Na odlétávající provoz by RET neměl žádný efekt. Proto je v této kapitole rozebrán vliv nové RET na propustnost RWY 30, a to pouze z pohledu přistávajících letounů. Pomocí simulačního modelu REDIM bylo možné získat hodnotu nové průměrné doby ROTA. Ta je následně vyjádřena počtem přistání, které by bylo možné provést navíc, a docílit tak zvýšení dráhové propustnosti.

### 8.6.1 Výpočet navýšení propustnosti

Z analýzy provozu v roce 2022 byl vybrán den, ve kterém byl registrován nejvyšší počet příletů v kategorii MEDIUM JET za hodinu. Jednalo se o neděli 12.6.2022, kdy bylo zaznamenáno 18 přistání za hodinu. K této hodnotě byla přiřazena průměrná doba, kterou letadla na dráze strávila, tedy čas ROTA 58,249 vteřin. Návrhem nové RET z RWY 30 by došlo ke změně průměrné časové obsazenosti dráhy při přistání. Z návrhové části práce byla zvolena první varianta řešení, která počítá s umístěním RET do pozice 1700 m od prahu dráhy. Scénářem, jež splnil všechny požadavky návrhu, je první varianta řešení se zvýšeným motivačním faktorem na hodnotě 1,15. Průměrná doba ROTA zde vyšla 49,704 vteřin. Průměrná časová úspora je získána rozdílem obou průměrných časů ROTA.

$$\Delta t = \text{průměrná ROTA ve skutečnosti} - \text{průměrná ROTA ve variantě č. 1}$$

$$\Delta t = 58,249 - 49,704 = \underline{8,545 \text{ s}}$$

Veličina  $\Delta t$  určuje průměrnou časovou úsporu na každém přistání letounu v kategorii MEDIUM JET na RWY 30, která by již byla vybavena RET dle varianty č. 1. Tato časová úspora je následně vynásobena počtem zaznamenaných přistání.

$$T = \Delta t * n = 8,545 * 18 = 153,8 \text{ s}$$

Vynásobením byl získán čas  $T$ , který popisuje kolik vteřin by se na takovém počtu příletů v průměru celkem ušetřilo sekund. Celkově ušetřený čas  $T$  je poté vydělen průměrnou dobou ROTA pro jeden přílet v kategorii MEDIUM JET s novou RET dle první varianty návrhu s motivačním faktorem 1,15.

$$p = \frac{T}{\text{průměrná ROTA ve scénáři č. 2}} = \frac{153,8}{49,704} = 3,094 \approx 3$$

Vypočtena hodnota  $p$  už vyjadřuje samotné navýšení propustnosti. Závěrem výpočtu tedy je, že na dráze 30 by bylo možné zkrácením času ROTA pomocí nové RET dle první varianty návrhu provést o tři přistání navíc.

## 9 Diskuze

Cílem diplomové práce bylo navrhnout možnost navýšení propustnosti RWY 30 na LKPR. Řešení bylo provedeno pomocí přidání nového výjezdu pro rychlé odbočení z dráhy. Hlavním výstupem je návrh, který počítá s jeho umístěním do vzdálenosti 1700 m od prahu dráhy. Průměrná doba strávená na dráze, tedy čas ROTA, by se rovnal hodnotě 49,704 vteřin a nový výjezd z RWY 30 by využilo 81,2 % provozu. Byly tak splněny všechny předem stanovené požadavky návrhu. Bylo zjištěno, že snížením průměrné doby ROTA by bylo možné na RWY 30 provést za jednu hodinu o tři přistání navíc.

Je nutné si uvědomit jistá omezení výzkumu. V simulaci byl zahrnut pouze provoz kategorie MEDIUM JET, který však tvoří většinové zastoupení provozu na LKPR. Chování ostatního provozu bylo s ohledem na jeho nízký výskyt zanedbáno. V reálném provozu také část letadel využila pro svůj výjezd z dráhy 30 výjezdy TWY F a TWY D. Simulační model nesimuloval na těchto výjezdech žádný provoz. Tato chyba byla zanedbána, a to jednak s ohledem na jejich velmi nízké využití, jejich vzdálenost od prahu dráhy i jejich nevhodný tvar pro výjezd. Simulační model byl validován s chybou  $\pm 0,25$  vteřin v simulaci času ROTA a s chybou  $\pm 4$  % v distribuci provozu na výjezdech.

V simulaci byl také změněn tzv. motivační faktor, který v simulaci zohledňuje chování posádek při přistání. Základním nastavením, který byl validován je provoz s hodnotou faktoru 0,9. To odpovídá snížení decelerace letadel oproti jejich nominálnímu chování o 0,1, tedy přibližně o 10 %. Jedná se o logickou úpravu, jelikož většinově využívaný výjezd TWY G je umístěn poměrně daleko, a letouny tak mohou použít nižší hodnotu zpomalení pro plynulý výjezd z dráhy. Ve výsledném scénáři, kdy došlo ke snížení času ROTA na 49,704 vteřin byl motivační faktor nastaven na 1,15. To znamená, že oproti stávajícímu chování letadel na RWY 30 byla úroveň průměrné decelerace zvýšena o přibližně 25 %. Oproti nominálnímu chování, které odpovídá hodnotě motivačního faktoru 1,0 by letouny musely zvýšit svoji deceleraci přibližně o 15 %. Nabízí se tím prostor k dalšímu zkoumání vlivu na výkonnost letadel při přistání a jaké konkrétní nároky by tím na ně byly kladeny.

Získanou hodnotu navýšení propustnosti, je nutné chápat v širším kontextu problematiky. Čas ROTA představuje pouze dílčí část z celkové doby, kterou letadlo z pohledu propustnosti zabere při přistání. V praktickém provozu nelze zajistit, aby následující přistávající letoun přelétl prah dráhy přesně v okamžiku, kdy ji předchází letoun uvolnil. Aby mohl mít nový výjezd skutečně pozitivní efekt na propustnost dráhy, musela by jeho realizace být doplněna úpravou rozstupů letadel při přistání.

## 10 Závěr

Letiště Václava Havla Praha čelí, stejně jako jiná letiště a jiné subjekty v letectví, stále rostoucí poptávce po letecké dopravě. Patrné to je jak na zvyšujícím se počtu přepravených cestujících, tak na počtech zaznamenaných pohybů (vzlet či přistání letadla na dráze). Je to právě vzletová a přistávací dráha, dále také RWY, jež tvoří páteřní prvek letištní infrastruktury. Parametry dráhy, zejména pak infrastruktura výjezdů, může ovlivnit její propustnost, a proto je vhodné se blíže zabývat možnostmi jejího navýšení.

Letiště Praha sice využívá primárně hlavní RWY 06/24, nicméně v případě nemožnosti jejího použití, je nutné zajistit odbavení plnohodnotného provozu. K tomu slouží vedlejší RWY 12/30. V rámci rozboru provozu na LKPR, byla využita data z období údržby hlavní dráhy v roce 2022, kdy musel být provoz převeden na dráhu vedlejší. Bylo zjištěno, že průměrná doba, kterou letadla kategorie MEDIUM JET strávila na dráze 30 při přistání (dále také čas ROTA), byla ve sledovaném období 58,249 vteřin. Bylo také zjištěno, že současné rozmístění výjezdů z RWY 30 není z pohledu maximální propustnosti zcela ideální. Proto se diplomová práce zabývala možnostmi, jak navýšit propustnost dráhy 30 pro přistání, a to pomocí výstavby nového výjezdu pro rychlé odbočení tzv. RET. Cílem práce bylo vytvořit návrh konkrétního řešení, jež povede k navýšení propustnosti RWY 30.

Při návrhu pozice výjezdu bylo nutné zohlednit jak požadavky vycházející z předpisu pro návrh RET, tak požadavky ze strany Letiště Praha. Jedním z požadavků bylo snížit průměrnou dobu ROTA pod 50 vteřin. To proto, aby nový výjezd pro rychlé odbočení případně do budoucna neznemožnil použití tzv. procedury snížených minim rozstupů při přistání. Pro potřebu simulace přistávajícího provozu byl použit simulační model REDIM. Ten byl na základě sledování předem určených parametrů validován. Následně byly provedeny dvě varianty návrhu řešení nového výjezdu pro rychlé odbočení. Po důkladné analýze chování provozu na jednotlivých variantách a zhodnocení jejich vhodnosti v rámci stanovených požadavků, byla vybrána první varianta návrhu. Ta počítá s umístěním RET do vzdálenosti 1700 m od prahu dráhy 30.

Přistávající provoz v simulaci první varianty návrhu, s motivačním faktorem na hodnotě 1,15, vykázal průměrnou dobu ROTA 49,704 vteřin s chybou simulace  $\pm 0,25$  vteřin. Nový výjezd byl využit 81,2 % provozu s chybou simulace  $\pm 4$  %. Převedením na propustnost by díky této změně v infrastruktuře bylo možné na RWY 30 provést průměrně za jednu hodinu o tři přistání navíc. V tomto směru došlo k naplnění cílů práce, jelikož varianta návrhu splňuje požadovaná kritéria a došlo k navýšení propustnosti dráhy 30.

Hodnoty získané ve výpočtu podporují tvrzení, že při hodnocení propustnosti dráhy záleží na infrastruktuře výjezdů, zejména na jejich umístění. Přidání nové RET zde odpovídá snížení průměrného času ROTA o 8,545 sekund. To představuje z pohledu propustnosti dráhy možnost třech přistání za jednu hodinu navíc. Přistání je však z pohledu času tvořeno nejen dobou ROTA, ale i časovým úsekem stráveným při přiblížení na dráhu. Z praktického pohledu je tak třeba si uvědomit, že samotnou výstavbou nové RET by k uvedenému navýšení propustnosti nemuselo dojít. Pro zajištění maximálního efektu na propustnost musí být změna infrastruktury v souladu s úpravou rozstupů při přistání. Simulace provozu na navržené infrastruktuře RWY 30 vykázala průměrný čas ROTA nižší než 50 vteřin, což je jednou z podmínek pro aplikaci snížených rozstupů. Návrh tedy do budoucna neznemožňuje případné použití této procedury.

Pro dosažení uvedených parametrů provozu na dráze s novým výjezdem bylo nutné upravit chování letadel při přistání. Bylo zjištěno, že výsledné doby ROTA 49,704 vteřin bylo možné docílit při zvýšení průměrné decelerace letadel. Konkrétně se jednalo, oproti jejímu standardnímu průběhu v simulaci, o zvýšení přibližně 15 %. Snahou leteckých společností je snížit své náklady na údržbu. Je tak otázkou, jaký konkrétní dopad by toto zvýšení na letouny mělo a zda by jej v běžném provozu bylo možné docílit.

Je také potřeba zohlednit zasazení provedeného návrhu do dlouhodobých plánů letiště. V reakci na zvyšující se poptávku vytvořilo Letiště Praha plán svého dlouhodobého rozvoje. V rámci něj se počítá s rozšířením terminálů i odbavovacích ploch. Vrcholnou částí rozvoje je pak projekt nové paralelní dráhy, jež má být situována jižně od stávající hlavní dráhy 06/24. V rámci výstavby paralelní dráhy se již nepočítá s dalším využitím vedlejší dráhy 12/30 pro vzlety či přistání letadel. Dokud však nedojde k realizaci tohoto projektu, je na místě se zabývat vedlejší dráhou, a to pro zajištění zastupitelnosti drah. Neodmyslitelnou roli v celé problematice hraje také finanční aspekt. Každý zásah do letištní infrastruktury představuje nákladnou položku a výstavba nového výjezdu pro rychlé odbočení není výjimkou.

Provedená studie tak otevírá možnost dalšího zkoumání tématu. To jak z pohledu vlivu na výkonnost letadel, vlivu na úpravu rozstupů při přistání, tak z pohledu finanční stránky. Je zřejmé, že komplexnost této problematiky zanáší do návrhového procesu další aspekty, kterými by bylo nutné se dále zabývat. Předmětem diplomové práce však bylo popsat možnost navýšení propustnosti dráhy 30, které je provedeno pomocí výstavby nového výjezdu pro rychlé odbočení. Došlo tak k naplnění stanoveného cíle, kdy je uvedeno konkrétní řešení problému, včetně jeho zákresu do letištní infrastruktury.

## Seznam použité literatury

- [1] BRANUM, Mike. ICAO MID Regional Seminar on Airport Master Planning. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.icao.int/MID/Documents/2022/Airport%20Master%20Seminar/AMP%20%20-%20Airport%20capacity.pdf>. [cit. 2023-09-15].
- [2] PAVLIN, Stanislav. RUNWAY OCCUPANCY TIME AS ELEMENT OF RUNWAY CAPACITY. Online. Zagreb, Republic of Croatia: University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences, 2006. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/296943379\\_Runway\\_Occupancy\\_Time\\_as\\_Element\\_of\\_Runway\\_Capacity](https://www.researchgate.net/publication/296943379_Runway_Occupancy_Time_as_Element_of_Runway_Capacity). [cit. 2023-09-15].
- [3] Zhi Jun Lim; , Sim Kuan Goh; , Imen Dhief a , Sameer Alam. Causal effects of landing parameters on runway occupancy time using causal machine learning models. Online. Singapore: School of Mechanical and Aerospace Engineering Nanyang Technological University, 2020. Dostupné z: [https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/146537/2/Causal\\_Machine\\_Learning\\_on\\_ROT\\_final.pdf](https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10356/146537/2/Causal_Machine_Learning_on_ROT_final.pdf) [cit. 2023-09-15].
- [4] Richard de Neufville a , Amedeo R. Odoni. Airport Systems. Online. 2nd ed. New York: McGrawHill Education, © 2013. ISBN 978-0-07-177058-3. Dostupné z: [https://soaneemrana.org/onewebmedia/AIRPORT%20SYSTEMS%20\(PLANNING,%20DESIGN%20&%20MANAGEMENT\)%20BY%20RICHARD%20DE%20NEULFVILLE.pdf](https://soaneemrana.org/onewebmedia/AIRPORT%20SYSTEMS%20(PLANNING,%20DESIGN%20&%20MANAGEMENT)%20BY%20RICHARD%20DE%20NEULFVILLE.pdf) [cit. 2023-09-25].
- [5] N. Hinze, A. Zolfaghari, O. Afshin, and A. Trani. Runway Exit Design Tool and Landing Events Database: Industry Meeting. Online. 2023. Dostupné z: [https://atsl.cee.vt.edu/content/dam/atsl\\_ee\\_vt\\_edu/redim4/REDIM%20Presentation%20Industry%20Meeting%20Feb2\\_2023\\_rfs.pdf](https://atsl.cee.vt.edu/content/dam/atsl_ee_vt_edu/redim4/REDIM%20Presentation%20Industry%20Meeting%20Feb2_2023_rfs.pdf). [cit. 2023-09-25].
- [6] Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge. Online. Oklahoma City: U.S. Department of Transportation FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, 2016. Dostupné z: [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-03/pilot\\_handbook.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-03/pilot_handbook.pdf). [cit. 2023-09-25].
- [7] L4444 - POSTUPY PRO LETOVÉ NAVIGAČNÍ SLUŽBY USPOŘÁDÁNÍ LETOVÉHO PROVOZU. Online. 2021. Praha: MINISTERSTVO DOPRAVY ČESKÉ REPUBLIKY, 2011. Dostupné z: [https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/data/print/L-4444\\_cely.pdf](https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/data/print/L-4444_cely.pdf). [cit. 2023-09-30].
- [8] Florián, Jan. Informace od Řízení letového provozu České republiky, s.p. získané osobní konzultací (Jindřišská 8, 110 00 Nové Město) dne 8.10.2023
- [9] LÍKAŘ, Petr. Informace od Letiště Praha, a.s. získané osobní konzultací (Aviatická 1017/02 - Letiště Václava Havla – Terminál 1 dne 10.10.2023
- [10] Stephen O'Flynn. AIRPORT CAPACITY ASSESSMENT METHODOLOGY. Online. 2016. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/nom-apt-acap-acamman-v1-1.pdf>. [cit. 2023-10-15].

- [11] Aerodrome Design Manual, Part 2, Taxiways, Aprons and Holding Bays. Online. 2005. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3090.pdf>. [cit. 2023-10-15].
- [12] EVROPSKÁ UNIE PRO BEZPEČNOST LETECTVÍ (EASA). CS ADR-DSN – 6. vydání. Online. 2022. Dostupné z: [https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2022/05/Decision\\_ED\\_2022\\_006\\_RAnnex\\_CS.pdf?cb=042020edb17f0e688777482891d7037d](https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2022/05/Decision_ED_2022_006_RAnnex_CS.pdf?cb=042020edb17f0e688777482891d7037d). [cit. 2023-10-15].
- [13] Modeling and simulation of rapid exit taxiway. Online. AIR TRAFFIC TECHNOLOGY INTERNATIONAL. 2022. Dostupné z: [https://att.mydigitalpublication.co.uk/articles/modeling-and-simulation-of-rapid-exit-taxiways?m=63553&i=717571&view=articleBrowser&article\\_id=4092411&ver=html5](https://att.mydigitalpublication.co.uk/articles/modeling-and-simulation-of-rapid-exit-taxiways?m=63553&i=717571&view=articleBrowser&article_id=4092411&ver=html5). [cit. 2023-10-20].
- [14] Christopher Bryan Clemmer. DETERMINING THE LOCATION OF RUNWAY EXITS USING AIRPORT SURFACE DETECTION EQUIPMENT. Online, Master thesis. Daytona Beach, Florida: Embry-Riddle Aeronautical University, 2018. Dostupné z: <https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1420&context=edt>. [cit. 2023-10-20].
- [15] ŠLJUKIC, Štefan. SIMULATION MODEL FOR DETERMINING THE LOCATION OF RUNWAY EXIT. Online. University of Belgrade - Faculty of Transport and Traffic Engineering, 2018. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/330901171\\_SIMULATION\\_MODEL\\_FOR\\_DETERMINING\\_THE\\_LOCATION\\_OF\\_RUNWAY\\_EXIT](https://www.researchgate.net/publication/330901171_SIMULATION_MODEL_FOR_DETERMINING_THE_LOCATION_OF_RUNWAY_EXIT). [cit. 2023-10-20].
- [16] LETIŠTĚ PRAHA, A. S. Historie Letiště Václava Havla Praha. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.prg.aero/historie-letiste-vaclava-havla-praha>. [cit. 2023-10-20].
- [17] ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU ČR, S.P. Letecká informační příručka. Online. 2022. Dostupné z: [https://aim.rlp.cz/ais\\_data/www\\_main\\_control/frm\\_cz\\_aip.htm](https://aim.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm). [cit. 2023-10-25].
- [18] Bc. Marta Kyiashko. TERMINAL 3 - Letiště Praha. Online, diplomová práce, vedoucí Ing. arch. Radek Lampa. Praha: ČVUT FAKULTA ARCHITEKTURY, 2017. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/70626>. [cit. 2023-10-25].
- [19] Centrální odmrazovací stáníD3.dwg [výkresový soubor]. Letiště Praha, 21. 7. 2023.
- [20] Český Aeroholding, a.s. PŘÍLOHA C ZADÁVACÍ DOKUMENTACE – ZADÁNÍ INVESTIČNÍHO ZÁMĚRU: RET Y pro RWY 24 a trvalé zkrácení RWY 1230. 2018. [cit. 2023-10-25].
- [21] RET pro RWY 24 a trvalé zkrácení RWY 12/30, letiště Praha/Ruzyně: PŘÍLOHA Č. 4 SMLOUVY NA VYTVOŘENÍ PROJEKTOVÉ DOKUMENTACE A VÝKON INŽENÝRSKÉ ČINNOSTI – SPECIFIKACE STAVBY. 2018. [cit. 2023-10-25].

- [22] Dlouhodobý rozvoj Letiště Praha: Tisková konference. Online. Praha: Letiště Praha, 2019. Dostupné z: [https://zdopravy.cz/wp-content/uploads/2019/11/Prezentace-Leti%C5%A1t%C4%9B-Praha\\_Rozvoj\\_13112019.pdf](https://zdopravy.cz/wp-content/uploads/2019/11/Prezentace-Leti%C5%A1t%C4%9B-Praha_Rozvoj_13112019.pdf). [cit. 2023-10-25].
- [23] Prague Airport – Future Vision. In: Youtube [online]. 27.03.2018 Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=o8u7rGrSwPY> [cit.2023-10-25]
- [24] 2279: PD APN D2 + TWY M1 a M2 a propojení s TWY L, na letišti Praha Ruzyně. Online. 2021. Dostupné z: <https://tenderarena.cz/dodavatel/seznam-profilu-zadavatele/detail/Z0005204/zakazka/534703>. [cit. 2023-10-25].
- [25] Data poskytl Ing. Petr Líkař, Letištní inženýr, Letiště Praha, a. s., v Praze dne 11.7.2023.
- [26] Data poskytl RNDr. Pichl Richard, Ph.D , analytik Leteckých navigačních služeb, v Praze dne 13.9.2023
- [27] LETIŠTĚ PRAHA, A. S. Letecký provoz se na tři měsíce kvůli údržbě přesune na vedlejší dráhu. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.prg.aero/letecky-provoz-se-na-tri-mesice-kvuli-udrzbe-presune-na-vedlejsi-drahu>. [cit. 2023-10-25].
- [28] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. Advisory Circular. Online. In: . USA, 2022, 4.8.4.1.4.a. Dostupné z: [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/150-5300-13B-Airport-Design.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150-5300-13B-Airport-Design.pdf). [cit. 2023-11-05].
- [29] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Měsíční a roční data dle zákona 123/1998 Sb. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data/mesicni-data-dle-z.-123-1998-Sb#>. [cit. 2023-11-05].
- [30] Ing. Michal Dorda, Ph.D. Úvod do modelování a simulace systémů. Online. Dostupné z: [https://homel.vsb.cz/~dor028/Aplikace\\_2.pdf](https://homel.vsb.cz/~dor028/Aplikace_2.pdf). [cit. 2023-11-05].
- [31] Adriana Řeháčková. ROZPTYL A DALŠÍ MÍRY VARIABILITY. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.statistickyneklasicky.cz/rozptyl-a-dalsi-miry-variability/>. [cit. 2023-11-05]
- [32] VFU BRNO. Testování hypotéz ve statistice. Online. 2022. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/hypotezy.htm>. [cit. 2023-11-05].
- [33] ÚSTAV APLIKOVANÉ MATEMATIKY FD ČVUT. Testování hypotéz. Online. Dostupné z: [https://www.fd.cvut.cz/departament/k611/pedagog/K611THO\\_soubory/0\\_testovani%20hypotez.pdf](https://www.fd.cvut.cz/departament/k611/pedagog/K611THO_soubory/0_testovani%20hypotez.pdf). [cit. 2023-11-10].
- [34] INSTITUT BIOSTATISTIKY A ANALÝZ LÉKAŘSKÉ FAKULTY MASARYKOVY UNIVERZITY. Centrální limitní věta. Online. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=aplikovana-analyza-klinickyh-a-biologickyh-dat--analyza-a-management-dat-pro-zdravotnicke-obory--bodove-a-intervalove-odhady--teoreticke-pozadi-intervalovych-odhadu--centralni-limitni-veta>. [cit. 2023-11-10].



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Průběh přistání letadla .....	12
Obrázek 2: Design RET .....	18
Obrázek 3: Areál LKPR .....	23
Obrázek 4: Měření LDA u výjezdu z RWY.....	24
Obrázek 5: Výjezdy z RWY30 .....	25
Obrázek 6: Projekt paralelní dráhy .....	27
Obrázek 7: Projekt Centrálního odmrazovacího stání .....	28
Obrázek 8: Graf využití drah na LKPR .....	32
Obrázek 9: Graf počtu pohybů na LKPR v čase .....	33
Obrázek 10: Graf počtu pohybů 17.6.2022 a aproximace provozu .....	34
Obrázek 11: Graf skladby provozu na LKPR .....	35
Obrázek 12: Graf využití výjezdů na RWY30 (vytvořeno pomocí [26]) .....	35
Obrázek 13: Algoritmus programu REDIM .....	38
Obrázek 14: Graf vlivu motiv. faktoru na průběh zpomalení.....	39
Obrázek 15: Způsoby měření ROTA v simulaci .....	43
Obrázek 16: Graf distribuce provozu v simulaci.....	50
Obrázek 17: Rozšíření TWY v oblouku .....	53
Obrázek 18: Geometrie výjezdu pro kategorii letiště 3-4.....	54
Obrázek 19: Situace pro zakreslení návrhu RET .....	55
Obrázek 20: Zákres varianty č. 1 .....	57
Obrázek 21: Graf distribuce provozu na variantě č. 1 .....	60
Obrázek 22: Graf časů ROTA ve variantě č. 1 .....	60
Obrázek 23: Zákres varianty č. 2.....	62

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Kategorie WTC .....	15
Tabulka 2: Rozstupy letadel na přistání podle WTC.....	16
Tabulka 3: Označení letiště .....	21
Tabulka 4: Výjezdy z RWY 30.....	25
Tabulka 5: Postupy HIRO při přistání na RWY 30 .....	31
Tabulka 6: Kapacita drah na LKPR .....	31
Tabulka 7: Průměrná ROTA na výjezdech z RWY 30 .....	36
Tabulka 8: Nastavení výjezdů v simulaci.....	40
Tabulka 9: Oprava pozice výjezdu v simulaci .....	41
Tabulka 10: Pravidla pro určení výsledku statistického testu .....	46
Tabulka 11: Statistika referenčních dat z provozu na TWY G .....	47
Tabulka 12: Statistika simulovaných dat z provozu na TWY G .....	48
Tabulka 13: Výsledky validace doby ROTA na TWY G.....	49
Tabulka 14: Základní rozměry RET .....	53
Tabulka 15: Změna motivačního faktoru na variantě č. 1 .....	58
Tabulka 16: Změna motivačního faktoru na variantě č. 2.....	63

## Seznam příloh

Příloha 1: Letištní mapa LKPR .....	73
Příloha 2: Mapa pojíždění pro kritické typy letadel .....	74

Příloha 1: Letištní mapa LKPR [17]

