



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Nikita Saprykin

Rozstupy dle turbulence v úplavu

Bakalářská práce

2020



K621..... Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Nikita Saprykin

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 - LED - Letecká doprava

Název tématu (česky): **Rozstupy dle turbulence v úplavu**

Název tématu (anglicky): Wake Vortex Turbulence Separations

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Procedury a postupy využívané na letištích v Evropě umožňující zmenšování rozstupů mezi letadly ve fázi přiblížení a přistání
- Vliv turbulence v úplavu na rozstupy mezi letadly
- Kategorizace letadel, rozvoj a změny
- Provoz na Letišti Václava Havla – současné postupy
- Úprava postupů s využitím nových přístupů k minimům rozstupů podle turbulence v úplavu



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Tamas Kolos - Lakatos, R. John Hansman ICAT Report 2017 - A System Level Study of New Wake Turbulence Separation Concepts and Their Impact on Airport Capacity, MIT, USA

Bakalářská práce David Příhoda - Turbulence v úplavu, ČVUT v Praze, FD, LED, 2017

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Stanislav Pleninger, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **19. října 2018**

(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 bakalářské práce: **1. prosince 2020**

- 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



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Nikita Saprykin
jméno a podpis studenta

V Praze dne3. září 2020

Čestné prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze na 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 (autorských práv).

V Praze dne 1. prosince 2020



Nikita Saprykin

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Stanislavu Pleningerovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věnovaný čas během zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval pracovníku ŘLP ČR, panu Stanislavu Shmidtovi za sdílení svých cenných zkušeností a vědomostí potřebných k vytvoření této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své manželce, rodině a přátelům za jejich podporu nejen při psaní této bakalářské práce, ale i za trpělivost během celého studia.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Rozstupy dle turbulence v úplavu

Bakalářská práce

Srpen 2019

Nikita Saprykin

Abstrakt

Předmětem bakalářské práce "Rozstupy dle turbulence v úplavu" je posouzení různých konceptů minim rozstupů používaných na nejvytíženějších mezinárodních letištích. Na začátku jsou popsány aspekty dráhového systému, které jsou těsně spojené s kapacitou letiště a maximální propustností. Dalším krokem bylo prozkoumání Letiště Václava Havla v Praze (LKPR), jeho infrastruktury a specifických postupů. V práci jsou analyzovány přínosy zvolených konceptů z pohledu možných přínosů pro Letiště Václava Havla. Zároveň je navržena matice rozstupů založená na úplném párování všech letadel provozovaných na letišti LKPR a zhodnocen přínos tohoto konceptu.

Klíčová slova

Turbulence v úplavu, rozstup, rekatégorizace, kapacita, letiště, RWY (vzletová a přistávací dráha), TBS (rozstupy na základě času)

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FACULTY OF TRANSPORTATION SCIENCES

Wake vortex turbulence separations

Bakalářská práce

Srpen 2019

Nikita Saprykin

Abstract

The subject of Bachelor's thesis "Wake vortex turbulence separations" is the assessment of various concepts of separations minima operated at the busiest international airports. Initially, there are described aspects of the runway system capacity that are closely related to airport capacity and maximum throughput. The next step was exploration Václav Havel Airport in Prague (LKPR), its infrastructure and specific procedures. In this thesis were analyzed the benefits of selected concepts in terms of possible benefits for Vaclav Havel Airport. Simultaneously, there is proposed a separation matrix based on full Pairwise separations minima of all aircraft operated at LKPR and the benefits of this concept are evaluated.

Keywords

Wake turbulence, separation, recategorization, capacity, airport, RWY (Runway), TBS (Time-based Separation)

Obsah

1 Úvod	12
2 Koncepty, technická řešení a faktory mající vliv na rozstupy a kapacitu	14
2.1 Nejvytíženější letišti Evropy	14
2.1.1 Letiště Frankfurt nad Mohanem	14
2.1.2 Letiště Heathrow	15
2.1.3 Letiště Charlese de Gaulla	17
2.2 Aspekty dráhového systému ovlivňující kapacitu	17
2.2.1 Počet a uspořádání RWY	18
2.2.2 Rozstupy na paralelních drahách	18
2.2.3 Rozstupy na sbíhajících se drahách	20
2.2.4 Porovnávání různých konfigurací RWY	21
2.3 Pojezdové dráhy pro rychlé odbočení	21
2.4 Délka konečného přiblížení	22
2.5 Skladba letadel.....	23
2.6 Vítr	24
2.7 Buffery	25
2.8 Zkrácené rozstupy mezi letouny Large-Large	25
2.9 Koncepce Dual-Glideslope na přiblížení	26
2.10 Time-Based Separation	27
2.11 CSPR procedury	29
3 Význam turbulence v úplavu	29
3.1 Turbulence v úplavu.....	30
3.2 Nehody spojené s turbulenc v úplavu.....	31
3.2.1 Nehoda An-2 v Khersonu.....	31
3.2.2 Let American Airlines 587	31
3.2.3 Nehoda Yak-40 v Taškentu.....	31
3.2.4 Saab 340 Sydney	32
3.2.5 Nehoda Robin DR 400 v Německu.....	32
4 Kategorizace letadel – rozvoj a změny	32
4.1 Kategorizace podle ICAO	32
4.2 Změna kategorizace v ICAO Dokument 4444 (L4444 v ČR) od listopadu 2020 .	34
4.3 Kategorizace podle FAA	35
4.4 Rekategorizace a jejich plánovaný rozvoj a změny	37
4.4.1 RECAT 1 – RECAT EU	37
4.4.2 RECAT 2 – Pair Wise Separations (PWS)	40
4.4.3 RECAT 3 – Dynamic Pair Wise Separations (D-PWS)	41
5. Provozně technické parametry Letiště Václava Havla	42
5.1 Infrastruktura letiště LKPR	42

5.1.1	Technická charakteristika všech RWY na letišti	42
5.1.2	Provozní omezení RWY	42
5.1.3	Pojezdové dráhy na LKPR	42
5.1.4	Radionavigační vybavení	43
5.2	Specifické postupy na LKPR	43
5.3	Plánované projekty na letišti LKPR	45
5.3.1	Nová paralelní RWY	45
5.3.1.1	Pozitivní přínosy s novou paralelní dráhou	46
5.3.1.2	Parametry dráhy	46
5.3.1.3	Provozní status	46
5.3.1.4	Vozovka	47
5.3.1.5	Umístění	47
5.3.1.6	Technické vybavení	47
5.3.2	Řídicí věž	47
6	Úprava postupů s využitím nových přístupů k minimům rozstupů turbulence v úplavu	47
6.1	Postup řešení	48
6.2	Měření a zpracování dat	50
6.3	Uplatňování různých konceptů na Letišti Václava Havla	51
6.3.1	Přínosy z konceptu RECAT-EU	54
6.3.2	Přínosy z konceptu PWS	56
6.3.3	Přínosy z konceptu Large-Large 2NM	60
6.3.4	Přínosy z konceptu Dual-Glideslope	63
6.3.5	Přínosy z postavení paralelní RWY	66
6.3.6	Přínosy z konceptu TBS	69
6.4	Shrnutí výsledků	70
6.5	Vlastní návrh	73
6.5.1	Postup řešení	74
6.5.2	Předpokládané přínosy	78
7	Diskuze	81
8	Závěr	85
9	Seznam použitých zdrojů	87
10	Přílohy	92

Seznam obrázků

Obrázek 1: Letiště Frankfurt nad Mohanem [42]	14
Obrázek 2: Statistiky London Heathrow [43].....	15
Obrázek 3: Konfigurace RWY London Heathrow [45]	16
Obrázek 4: Program střídání RWY [46]	16
Obrázek 5: Konfigurace RWY CDG [47].....	17
Obrázek 6: Souvislost kapacity letiště a turbulence v úplavu [13].....	18
Obrázek 7: Provádění příletových a odletových operací na jedné RWY a CSPR dráhách [13]	19
Obrázek 8: Možnosti křížení u sbíhajících se drah [13].....	20
Obrázek 9: Délka konečného přiblížení [13]	22
Obrázek 10: Závislost délky konečného přiblížení na Fleet mixu [13]	23
Obrázek 11: Skladba letadel na LKPR 15.07.2019 (zdroj: vlastní zpracování)	24
Obrázek 12: Ground Speed [13]	25
Obrázek 13: Buffer [13].....	25
Obrázek 14: Přehled do Dual-Glideslope přiblížení [13].....	27
Obrázek 15: Snížení rozstupů pomocí využívání TBS pravidel [48]	28
Obrázek 16: Proudice popisující oblast turbulence v úplavu [50].....	30
Obrázek 17: Turbulence v úplavu [21]	30
Obrázek 18: RECAT-EU [21].....	38
Obrázek 19: Průměrná skladba letadel za den (zdroj: vlastní zpracování)	52
Obrázek 20: Skladba letadel v nejvytíženější den (15.7. 2019)	52
Obrázek 21: Skladba letadel ve špičkových hodinách na LKPR.....	53
Obrázek 22: PWS matice minim rozstupů [31]	58
Obrázek 23: Porovnání DBS a TBS za přítomnosti protivětru [52]	69
Obrázek 24: Rychlost větru v okolí Letiště LKPR [51]	70
Obrázek 25: Skladba letadel na LKPR v provozní špičce 14.07.2019	75
Obrázek 26: Skladba letadel na LKPR v provozní špičce 15.07.2019	75
Obrázek 27: Skladba letadel na LKPR v provozní špičce 16.07.2019	76
Obrázek 28: Skladba letadel na LKPR v provozní špičce 17.07.2019	76
Obrázek 29: Třídění letadel podle MTOW a rozpětí křídel (ICAO).....	77
Obrázek 30: Třídění letadel podle MTOW a rozpětí křídel (RECAT-EU).....	78

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozstupy pro paralelní dráhy (zdroj: vlastní zpracování dle [12])	19
Tabulka 2: Radarové rozstupy podle turbulence v úplavu dle ICAO	33
Tabulka 3: Rozstupy založené časem pro odlety (zdroj: vlastní zpracování dle [29]) ..	33
Tabulka 4: Rozstupy založené časem pro přilety (zdroj: vlastní zpracování dle [29]) ..	33
Tabulka 5: Nové standardy pro minima vzdálenostních rozstupů podle turbulence v úplavu od listopadu 2020 (zdroj: vlastní zpracování dle [29])	35
Tabulka 6: Rozstupy založené na vzdálenosti pro vzlety podle FAA	36
Tabulka 7: Rozstupy založené na vzdálenosti pro přiblížení podle FAA	36
Tabulka 8: Rozstupy podle RECAT 1 [21]	39
Tabulka 9: Rozstupy založené časem podle RECAT 1 [21]	39
Tabulka 10: Navigační vybavení na LKPR (zdroj: vlastní zpracování dle [35])	43
Tabulka 11: Vypočítané časové rezervy (zdroj: vlastní zpracování)	49
Tabulka 12: Vypočítaná maximální propustnost pro dráhu 06/24 za podmínky ICAO, ..	50
Tabulka 13: Přínosy RECAT-EU pro LKPR (zdroj: vlastní zpracování)	55
Tabulka 14: Vypočítaná maximální propustnost pro RECAT-EU koncept,	56
Tabulka 15: Přínosy PWS pro LKPR (zdroj: vlastní zpracování)	59
Tabulka 16: Vypočítaná maximální propustnost pro PWS koncept,	60
Tabulka 17: Přínosy z LARGE-LARGE 2NM (zdroj: vlastní zpracování)	62
Tabulka 18: Vypočítaná maximální propustnost pro Large-Large 2 NM koncept,	63
Tabulka 19: Minima rozstupy podle konceptu Dual-Glideslope	64
Tabulka 20: Přínosy z konceptu Dual-Glideslope (zdroj: vlastní zpracování)	65
Tabulka 21: Vypočítaná maximální propustnost pro Dual-Glideslope koncept,	66
Tabulka 22: Přínosy paralelní RWY (zdroj: vlastní zpracování)	67
Tabulka 23: Vypočítaná maximální propustnost pro 2 paralelní RWY,	68
Tabulka 24: Shrnutí výsledků ve výpočtovém tvaru (zdroj: vlastní zpracování)	71
Tabulka 25: Shrnutí výsledků ve statistickém tvaru (zdroj: vlastní zpracování)	72
Tabulka 26: Vlastní návrh – matice nových minim rozstupů	74
Tabulka 27: Přínosy z navržené matice minim rozstupů pro LKPR, (zdroj: vlastní zpracování)	79
Tabulka 28: Výsledky z matice minim rozstupů pro LKPR (zdroj: vlastní zpracování) ..	80
Tabulka 29: Porovnání výsledků práce s výsledky získané Technologickým Institutem Massachusetts – MIT (zdroj: vlastní zpracování)	84

Seznam použitých zkratek

ACC	Area Control Centre or Area Control	Oblastní středisko řízení nebo oblastní služba řízení
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance – Broadcast	Automatický závislý přehledový systém – rozhlasové vysílání
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance – Contract	Automatický závislý přehledový systém – kontrakt
AMSL	Above Mean Sea Level	Nadmořská výška
APP	Approach	Přiblížení
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
ATM	Air Traffic Management	Uspořádání letového provozu
CAT	ILS Category	Kategorie přístrojového přiblížení
CDG	Charlese de Gaulla Airport in Paris	Letiště Charlese de Gaulla v Paříži
CO ₂	Carbon dioxide	Oxid uhličitý
CSPR	Closely-Spaced Parallel Runways	Paralelní dráhy těsně umístěné mezi sebou
ČHMÚ	The Czech Hydrometeorological Institute	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Czech Republic	Česká Republika
DME	Distance Measuring Equipment	Měřič vzdálenosti
D – PWS	Dynamic Pair-Wise Separation	Rozstupy založené na úplném párování všech letadel dynamickým způsobem
DTOP	Dual Threshold Operation	Dvou prahové procedury
EASA	European Aviation Safety Agency	Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví
EIA	Environmental Impact Assessment	Vyhodnocení vlivů na životní prostředí
ESA	European Space Agency	Evropská kosmická agentura
EU	Europe Union	Evropská Unie

EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation	Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu
FAA	Final Approach Fix	Fix konečného přiblížení
FRA	International Airport in Frankfurt	Mezinárodní letiště ve Frankfurtu-nad-Mohanem
ft	Foot	Stopa
GBAS	Ground-Based Augmentation System	Pozemní navigační satelitní systém
GLONASS	Global Orbiting Navigation Satellite System	Globální navigační satelitní systém na oběžné dráze
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globální navigační satelitní systém
GS	Ground Speed	Rychlost vůči zemi
HALS	High Approach Landing System	Přistávací systém vysokého přiblížení
HIRO	High Intensity Runway Operation	Postupy na drahách s vysokou intenzitou provozu
HMI LORD	Human-Machine Interface	Rozhraní člověk-stroj – podpůrný nástroj pro řídicích letového provozu
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní sdružení leteckých dopravců
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Instrument Flight Rules	Pravidla pro let podle přístrojů
ILS	Instrument Landing System	Přístrojový přistávací systém
IMC	Instrument Meteorological Conditions	Meteorologické podmínky pro let podle přístrojů
LHR	London Heathrow Airport	Letiště Heathrow v Londýně
LKPR	Vaclav Havel Airport in Prague	Letiště Václava Havla v Praze
LOC	Localizer	Kurzový maják systému ILS
LVP	Low Visibility Procedures	Postupy za nízké viditelnosti
MTOW	Maximum Take off Weight	Maximální vzletová hmotnost
NM	Nautical Mile	Námořní míle
PSR	Primary Surveillance Radar	Primární přehledový radar

PWS	Pair-Wise Separation	Rozstupy založené na úplném párování všech letadel
RADAR	Radio Detection And Ranging	Radiolokátor
RECAT	Recategorisation	Rekategorizace
RECAT – EU	European Wake Vortex Recategorisation	Evropská rekategorizace
RNAV	Area Navigation	Prostorová navigace
RNP	Required Navigation Performance	Požadovaná navigační výkonnost
ROT	Runway Occupancy Time	Čas obsazení dráhy letadlem
RWY	Runway	Vzletová a přistávací dráha
ŘLP	ANS CR	Řízení Letového Provozu České republiky
SESAR	Single European Sky ATM Research	Jediný Evropský výzkum uspořádání vzdušného letového provozu
SEP tool	Separation Tool	Podpůrný nástroj pro rozstupy
SSR	Secondary Surveillance Radar	Sekundární přehledový radar
TBS	Time-Based Separation	Rozstupy na základě času
THR	Threshold	Práh dráhy
TMA	Terminal manoeuvring area (Terminal control area)	Koncová řízená oblast
TWR	Aerodrome Control Tower	Letištní řídicí věž
TWY	Taxiway	Pojezdová dráha
UK – NATS	National Air Traffic Services of United Kingdom	Hlavní nacionální aeronavigační služba Velké Británie
VFR	Visual Flight Rules	Pravidla pro let za viditelnosti
VHF	Very High Frequency	Velmi krátké vlny 30 až 300 MHz
VMC	Visual Meteorological Conditions	Meteorologické podmínky pro let za viditelnosti
VOR	VHF Omnidirectional Range	VKV všesměrový radiomaják
WDS	Weather Dependent Separation	Rozstupy závislé na počasí
WVC	Wake Vortex Category	Kategorie podle turbulence v úplavu

1 Úvod

V dnešní době mnozí lidé stále více využívají cestování letadlem, a to nejen pro byznys a pracovní schůzky, ale i pro rekreační účely. Dnes je letadlo nejbezpečnějším dopravním prostředkem na světě s nejmenším počtem negativních dopadů. Další výhodou cestování letadlem je v tom, že se můžete dostat kamkoliv a daleko nejrychleji, oproti například vlakům nebo lodím.

Počet cestujících letadlem neustále roste. Kvůli tomu se zvedá počet letů a destinace. Je však důležité říct, následkem mohou být neočekávaná zdržení na letištích, a to jak na zemi, tak i pro letadla ve vzduchu čekající na uvolnění dráhy pro přistání. Hlavním cílem z technického hlediska je, aby všechny procesy byly v souladu s postupy a nařízeními jak na vnitrostátní tak mezinárodní úrovni, tak při udržení vysoké úrovně bezpečnosti.

Jeden z nejnebezpečnějších jevů je turbulence v úplavu. Ta může ohrozit bezpečnost letadel s menší hmotností (MTOW) letící za letadly s větší MTOW ve fázi konečného přiblížení a na odletech.

Proto, aby nedošlo k riziku setkání s turbulencí v úplavu, existují speciální pravidla, která stanovují takzvaná minima rozstupů mezi letadly. Všechna pravidla musí být neustále a pečlivě dodržována proto, aby letadlo bezpečně přistálo, a aby jiné naopak vzlétlo. Tyto rozstupy se dělí dle různých kategorií letadel, a to především v závislosti na maximální vzletové hmotnosti letadla (MTOW). Rozstupy jsou vždy zajišťovány řídicími letového provozu (ATC). Kvůli narůstání počtu letů (zhuštění provozu) dojde ke zvýšení počtu pohybů za hodinu, což má za následek nutnost navýšení kapacity letiště, čímž vzniká potřeba snižování rozstupů. Z tohoto důvodu existují různé koncepty a postupy pro snížení minim rozstupů.

Předmětem této bakalářské práce je seznámení s různými koncepty a pravidly používanými na letištích pro snížení minim rozstupů mezi dvojicí letadel. Použití různých konceptů však záleží na každém letišti individuálně, a to podle: jeho uspořádání, na počtu a konfiguraci vzlétajících a přistávacích drah, na geografické poloze letiště, na povětrnostních podmínkách, na skladbě provozu letiště atd. Pro to, aby byly zvolené vhodné koncepty pro Letiště Václava Havla v Praze (LKPR), je potřeba zaměřit se na jeho základní technické charakteristiky a provozní postupy spojené s turbulencí v úplavu. Tato část bude věnovaná zejména: konfiguraci letiště, jeho budoucím návrhům a změnami a postupy spojenými jak s turbulencí v úplavu, tak i s kapacitou dráhy,

protože spolu vzájemně souvisí. Budou prozkoumány různé koncepty doposud neaplikované na letišti LKPR a jejich kapacitní přínosy z teoretického pohledu.

Hlavním cílem bakalářské práce je provedení analýzy a srovnání současně používaných pravidel rozstupů dle turbulence v úplavu ve všech jejích možných variantách a scénářích. Následně je třeba zjistit výhody a nevýhody současných pravidel oproti konceptům, které ještě nejsou aplikována, jako jsou například reorganizace EU (REACAT EU) s novým rozdělením kategorií, RECAT 2 neboli PWS (Pair-Wise Separation), kde má každé letadlo individuálně přidělené rozstupy nebo TBS (Time-Based Separation). Dále je potřeba se zamyslet nad efektivitou těchto postupů z pohledu jejich budoucího využití na LKPR. Dalším cílem je sestavení vlastní matice minim rozstupů individuálně pro Letiště Václava Havla na základě znalosti skladby provozu letiště. Poslední částí je vyhodnocení přínosů této matice oproti současnému stavu.

Závěrem bakalářské práce bude vyhodnocení všech konceptů včetně posouzení na jejich aplikování na Letišti Václava Havla v Praze.

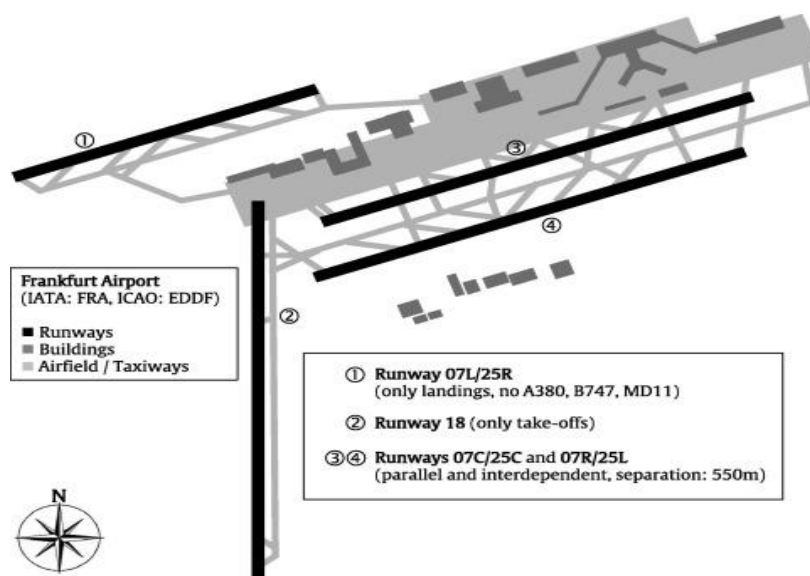
2 Koncepty, technická řešení a faktory mající vliv na rozstupy a kapacitu

2.1 Nejvytíženější letišti Evropy

2.1.1 Letiště Frankfurt nad Mohanem

Letiště Frankfurt nad Mohanem je největší německé letiště, které se nachází ve Frankfurtu nad Mohanem. Podle počtu cestujících (61 032 022 osob v roce 2015) se řadí na čtvrté místo v Evropě po londýnském Heathrow, Paříži Charlese de Gaulla a istanbulsém letišti Atatürk. Pokud jde o nákladní dopravu, řadí se na první místo v Evropě (2 076 734 tun v roce 2015). Letiště ve Frankfurtu bylo jedním z prvních letišť, které používalo automatický systém třídění zavazadel [1].

Frankfurtské letiště tvoří dva velké terminály a menší prvotřídní terminál, který slouží pouze pro leteckou společnost Lufthansa. Letiště má tři paralelní RWY a jednu dráhu použitelnou pouze pro vzlety. Všechny dráhy jsou dlouhé 4000 metrů. Dvě starší paralelní dráhy sice nemohou být provozovány nezávisle na sobě, avšak mohou být používány současně. 07L / 25R má asfalt, zbytek má beton. Tři pruhy – 07R / 25L, 07C / 25C, 18–4000 metrů dlouhé, 07L / 25R - 2800 metrů dlouhé. RWY 07R / 25L se používá pouze pro přistání. Dráha 18 se používá pouze pro vzlety na jih, proto v označení není uvedena hodnota „36“ pro směrový ukazatel přistání naproti „18“ [1].



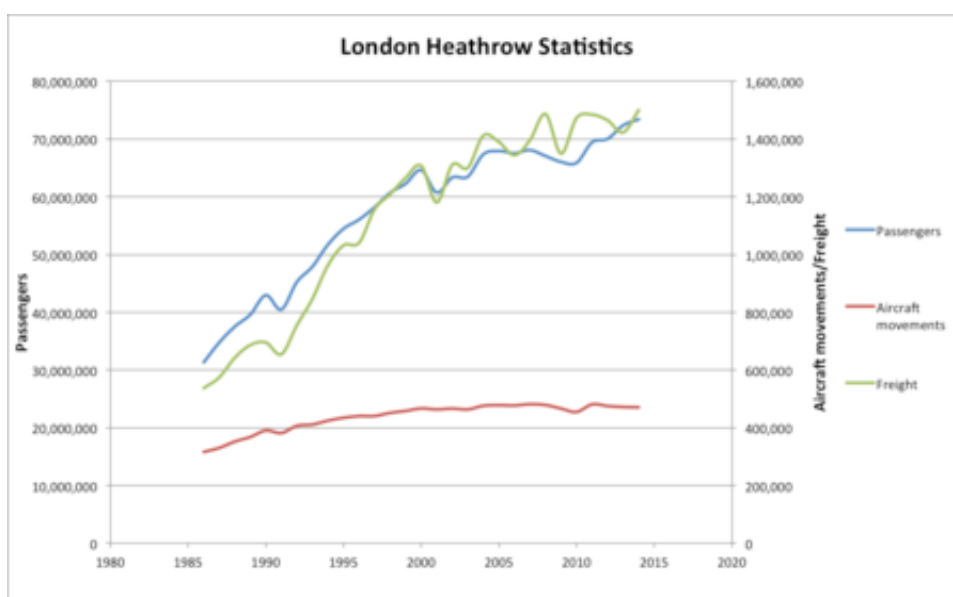
Obrázek 1: Letiště Frankfurt nad Mohanem [42]

Letiště Frankfurt z důvodů toho, že má soustavu paralelních závislých RWY, provádí v současné době procedury CSPR, což optimalizuje provoz a umožňuje vyšší kapacitu dráhového systému kvůli zkráceným rozstupům mezi letadly na přiblížení na paralelních drahách. Kromě toho se již aplikují pravidla koncepce RECAT-EU, kde jsou představena

nová minima rozstupů podle turbulence v úplavu. Před postavením nové paralelní RWY byly pokusy o zavedení koncepcí Dual-Glideslope kvůli dostatečné délce RWY pro provedení konceptu jenom ve zkušebním režimu. Tento koncept se nepovedl kvůli malým přínosům oproti další paralelní dráze [2].

2.1.2 Letiště Heathrow

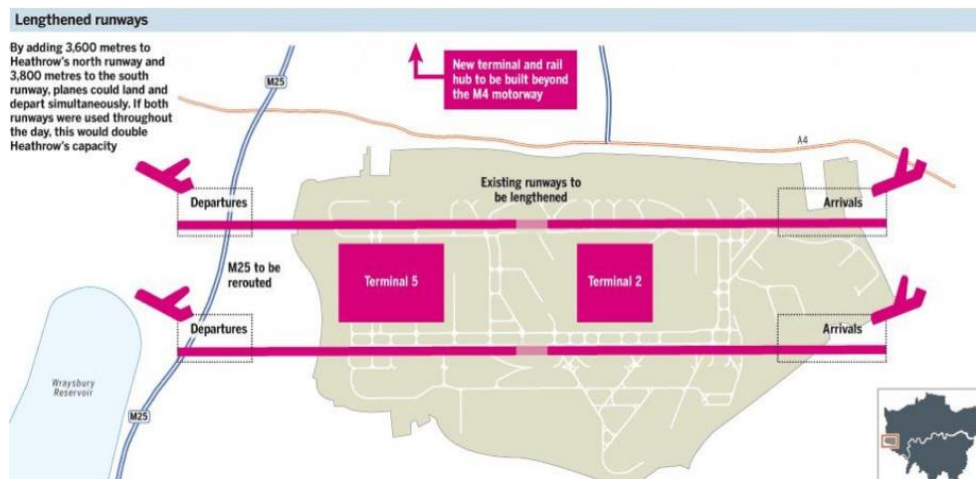
Heathrow bylo v roce 2018 podle počtu odbavených cestujících nejvytíženější letiště v Evropě a sedmé na světě [3]. V roce 2018 odbavilo letiště 80,1 milionů cestujících při 480 tisících pohybech letadel [4].



Obrázek 2: Statistiky London Heathrow [43]

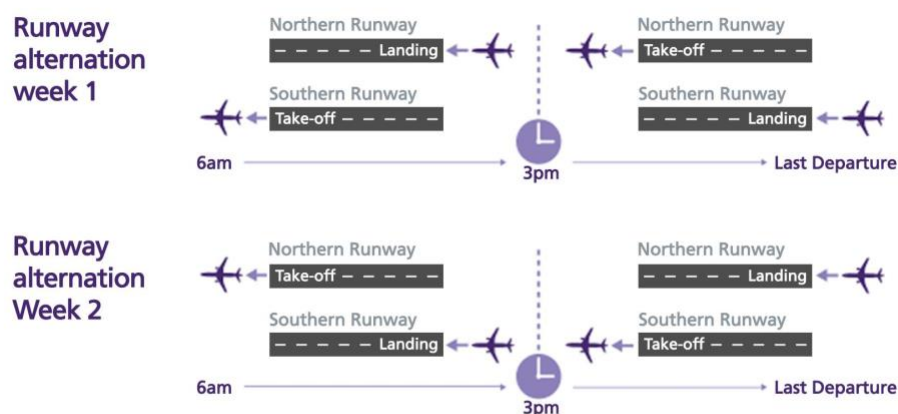
Aktuálně má letiště v provozu 5 terminálů pro odbavení cestujících a 1 nákladový terminál [44].

LHR má soustavu dvou paralelních drah – JÍŽNÍ a SEVERNÍ RWY, které nejsou závislé mezi sebou. V budoucnu se plánuje stavba třetí paralelní dráhy.



Obrázek 3: Konfigurace RWY London Heathrow [45]

Od 3. srpna 2020 začíná fungovat speciální program střídání RWY. Každý týden se mění role (přílety a odlety) mezi SEVERNÍ RWY (09L/27R) a JÍŽNÍ RWY (09R/27L) [6], [7].



When on westerly operations we operate a runway alternation programme that runs in a two week cycle. This gives residents living under both runway flight paths predictable relief from aircraft noise for half the day.

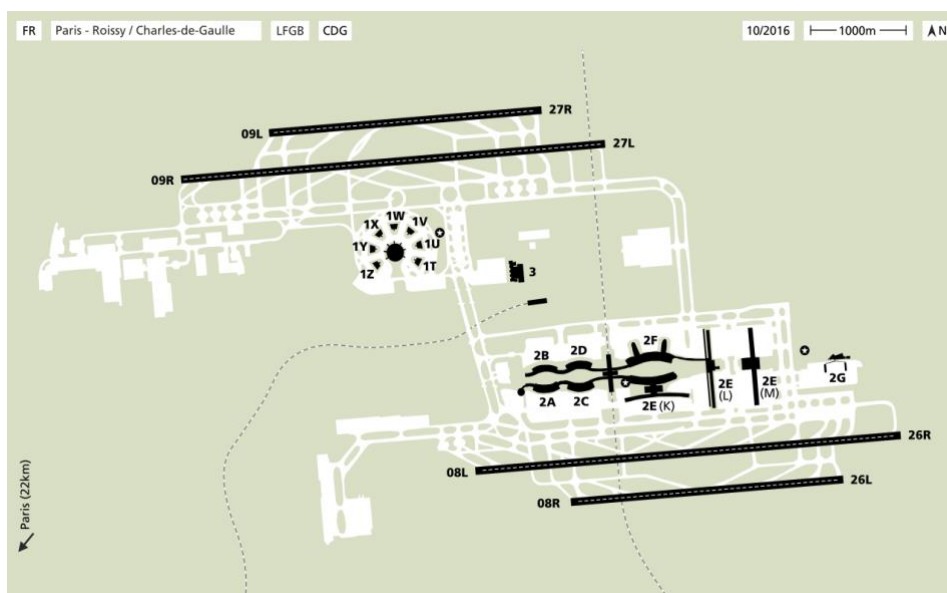
Obrázek 4: Program střídání RWY [46]

Za další koncepce již jsou používané na letišti Heathrow – zde je TBS od roku 2015, RECAT-EU od roku 2018, což způsobují pravidla pro získání zkrácených minim rozstupů k navýšení kapacity a pro částečnou kompenzaci zdržení letů. V provozních činnostech letiště Heathrow využívá koncepty TBS (Time-Based Separation), neboli rozstupy na základě času od roku 2015, RECAT-EU od roku 2018 a HIRO (High Intensity Runway Operation) [8], [9].

2.1.3 Letiště Charlese de Gaulla

Letiště Charlese de Gaulla je největší letiště v Paříži a druhé v Evropě po londýnském Heathrow. Letiště má 3 terminály. Terminál 1 řídí mezinárodní lety, mimo lety společnosti Air France. Terminál 2 je největší a stále se rozšiřující terminál, a proto slouží pro odbavení letů této společnosti a dalších spojení do Evropy či zámoří. Terminál 3 je hojně využíván pro odbavení nízkonákladových letů [10].

Letiště má dvě soustavy závislé na paralelních RWY. Jedna soustava paralelních drah je určena primárně pro přílety 09L/27R a 08R/26L, druhá primárně pro odlety 09R/27L a 08L/26R. Kvůli tomu jsou na letišti provozované CSPR procedury, což jsou procedury pro paralelní dráhy vzdálené méně než 2500 stop mezi sebou. To vede k optimálnímu využití dráhových systémů [5].



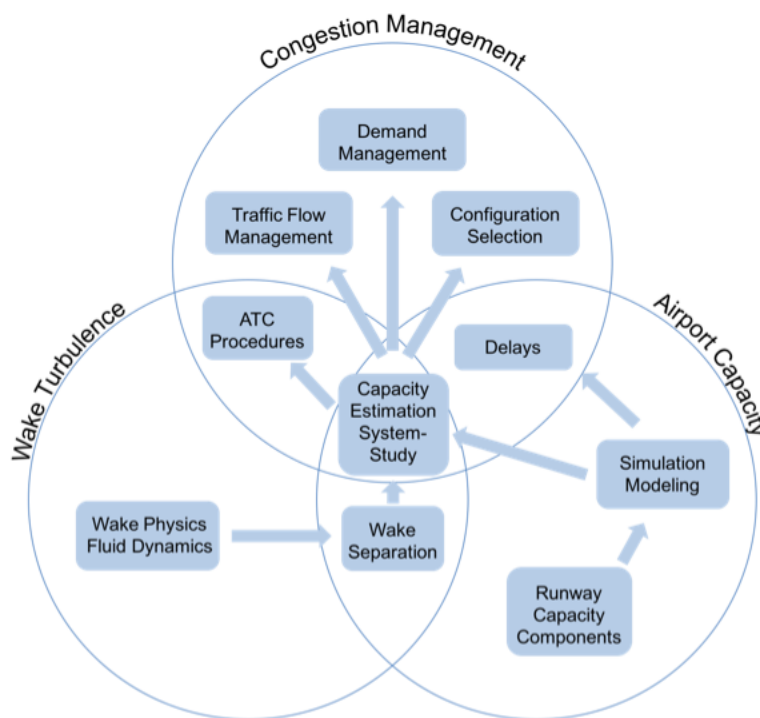
Obrázek 5: Konfigurace RWY CDG [47]

Letiště CDG je prvním letištem v EU provozujícím 1. fázi rekatégorizace: RECAT-EU od roku 2016 a HIRO (High Intensity Runway Operation) [9]. Tyto koncepty pomocí redukce minima rozestupů odstraňují zpoždění letů, zmenšují emise a pozitivně ovlivňují kapacitu dráhového systému.

2.2 Aspekty dráhového systému ovlivňující kapacitu

Tato podkapitola bakalářské práce bude věnovaná aspektům dráhového systému, které mohou ovlivnit kapacitu letiště. Tyto aspekty jsou důležité zejména proto, že kapacita letiště a turbulence v úplavu vzájemně souvisí. Obrázek 6 ukazuje, že jeden z hlavních faktorů sjednocující fyzický nebezpečný jev ("Wake Turbulence" na obrázku 6) a kapacitu

letišť ("Airport Capacity") jsou rozstupy dle turbulenci v úplavu. ("Wake Separations" na obrázku 6).



Obrázek 6: Souvislost kapacity letiště a turbulence v úplavu [13]

2.2.1 Počet a uspořádání RWY

Jedním z nejjednodušších způsobů, jak zvýšit kapacitu dráhy, je investice do nové infrastruktury a vybudování nové dráhy. Jako omezující faktor však často může posloužit dostupný prostor a zeměpisná poloha letiště. Obvykle čím je větší nezávislost mezi dvěma RWY (pohyb letadel na jedné RWY může být proveden bez nebo velmi malého ovlivňování pohybu letadel na druhé), tím větší kapacitu může poskytnout. Nicméně tato nezávislost vyžaduje větší finanční investice kvůli většímu záboru půdy, proto je třeba také vyhodnotit alternativní uspořádání [13]. Minimální podélný rozstup mezi letadly je dle ICAO 5,6 km (3 NM) při přiblížení i odletu. Liší se na základě počtu a uspořádání drah [12]. Rozstupy mezi dvěma přibližujícími se letadly jsou stanoveny na 3 NM. Mezi osami přiblížení je vyhlášen ochranný prostor [11].

2.2.2 Rozstupy na paralelních drahách

Nezávislé paralelní odlety lze provozovat pouze, pokud je splněna minimální osová vzdálenost 760 m. Dále se musí tratě paralelně odlétávajících letadel ihned po startu rozbíhat minimálně o 15° a provoz musí být sledován vhodným přehledovým radarem [11]. Aby došlo k plnému využití kapacity, je důležité správně zvolit režim provozu

na paralelních drahách. Rozstupy pro paralelní dráhový systém se určují na základě vzdálenosti mezi jednotlivými drahami, viz tabulka 1. Dráhy se využívají buď v segregovaném režimu, kdy se jedna dráha využívá pouze pro odlety a druhá pouze pro přílety, nebo ve smíšeném režimu, kdy jsou obě RWY využívány kombinovaně jak pro vzlety, tak pro přistání [12].

Tabulka 1: Rozstupy pro paralelní dráhy (zdroj: vlastní zpracování dle [12])

Vzdálenost mezi drahami	Přílety/Přílety	Odlety/Odlety	Přílety/Odlety	Odlety/Přílety
Do 762 m	Stejně jako u jedné RWY	Stejně jako u jedné RWY	Provede se přistání	Provede se vzlet
762–1310 m	1,5 NM	Nezávislé	Nezávislé	Nezávislé
Více než 1310 m	Nezávislé	Nezávislé	Nezávislé	Nezávislé

Nezávislá druhá paralelní RWY může zdvojnásobit kapacitu jedné dráhy, pokud se použijí stejná skladba letadel, stejná pravidla, a nebude vyžadováno přidávat další rozstupy [13].



Obrázek 7: Provádění příletových a odletových operací na jedné RWY a C-SPR drahách [13]

Jak je znázorněno na obrázku 7, když první letadlo (A1) přeletělo práh dráhy pro přistání, druhé letadlo (D2) může postupovat na RWY. Letadlo bude (D2) připravené pro vzlet, když (A1) už opustilo RWY, což znamená, že limitující faktor pro obsazení dráhy byl dodržen a zároveň byl splněn časový rozstup mezi odlety (D1) a (D2). Odlet (D2) na jedné dráze je omezen časem obsazení dráhy letadlem (A1) [13].

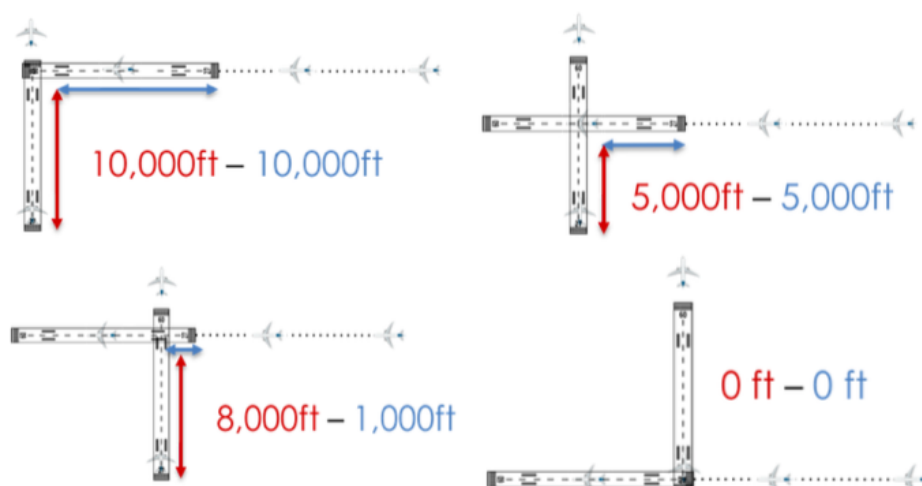
Při pohledu na stejnou sekvenci v konfiguraci C-SPR je letadlo (D2), které se nachází na dráze, připraveno ke vzletu, jakmile je splněn rozstup mezi odlety (D1) - (D2) a jakmile (A1) přeletělo práh dráhy pro přistání. Je možné, že v době, kdy letadlo (A1) přistává, rozstup mezi (D1) - (D2) neomezuje vzlet (D2). Minimální rozstup mezi (A1) a (D2) je

tedy doba obsazenosti (A1) na dráze, avšak v případě CSPR může být až nula sekund. To znamená, že další RWY v konfiguraci CSPR může zvýšit kapacitu oproti konfiguraci s jednou RWY [13].

2.2.3 Rozstupy na sbíhajících se drahách

Minimální rozstupy u sbíhajících se drah nejsou přesně definovány. Liší se na základě podmínek letiště a státu. Jsou ovlivněny místem křížení drah, velikostí úhlu drah, typem letounů, počtem pohybů a dalšími faktory. Nejvyšší kapacity je dosaženo v případě, kdy se dráhy křížují na začátku ve směru provozu, a je tak možné dosáhnout stejné kapacity jako u paralelních drah s krátkou nebo střední osovou vzdáleností. Naopak nejnižší kapacity dosáhneme v případě, kdy provoz na jedné z drah je omezen bočním větrem, což způsobuje snížení celkové kapacity drahového systému na úroveň s jednou RWY [12].

Nejnižší kapacita RWY se projevuje, když se obě dráhy setkají na vzdálenějším konci. V této konfiguraci odlétávající letadla vyčkávají, až přistávající letadla uvolní RWY těsně před odletem. Toto vyčkávání je zapotřebí v případě, že příletové letadlo zahájí go-around manévr a poletí přes dráhu odletajícího letadla [13].



Obrázek 8: Možnosti křížení u sbíhajících se drah [13]

Další možnost umístění bodu křížení drah je ve středu a přilétávající letadla se dotýkají dráhy před tímto bodem. Odlétávající letadla mohou mít povolení pro vzlet, jakmile přistávající letadlo přejezd křižovatku. Vzhledem k tomu, že přejezd bodu křížení pro přilétávající letadla trvá míň času než sjezd z RWY na pojezdovou dráhu, rozstup mezi

přilet-odlet se zkrátí. V důsledku toho poslední dvě konfigurace na obrázku 8 vedou k vyšší kapacitě dráhy [13].

Přílety a odlety jsou na sbíhajících dráhách různé. To znamená, že v případě bodu křížení drah na začátku odlet po přistání může být proveden dřív, než v případě drah s bodem křížení ve středu nebo s křížením blížícím se ke konci drah [13].

Trochu jinak vypadá situace po přistání letadel typu Heavy (v některých státech zvláště i letadel typu B757). Dělá se to pro případy, kdy odlétávající letadlo poletí přes vzdušnou cestu přistávajícího Heavy nebo naopak přilétávající letadlo poletí cestou vzlétajícího Heavy, a vznikne tak nárok na zvětšení rozstupu o 2 minuty. Tento rozstup se přidává z bezpečnostních důvodů proti setkání z turbulence v úplavu, ale může také vést ke ztrátě kapacity přistávací dráhy [13].

Konfigurace se sbíhajícími se dráhy s bodem křížení na začátku funguje podobně jako u paralelně závislých RWY [13].

2.2.4 Porovnávání různých konfigurací RWY

Mnoho letišť pracuje ve smíšených konfiguracích, kde přílety a odlety sdílejí stejnou dráhu. Tři konfigurace RWY jsou vyhodnocovány ve smíšeném provozu: jedna RWY, sbíhající se dráhy a paralelní dráhy. Jak sbíhající se dráhy, tak i paralelně závislé dráhy fungují s jednou dráhou určenou výhradně pro přílety a druhou výhradně pro vzlety. Při porovnávání hodnot kapacity ve smíšeném režimu je však možno pozorovat významné rozdíly [13].

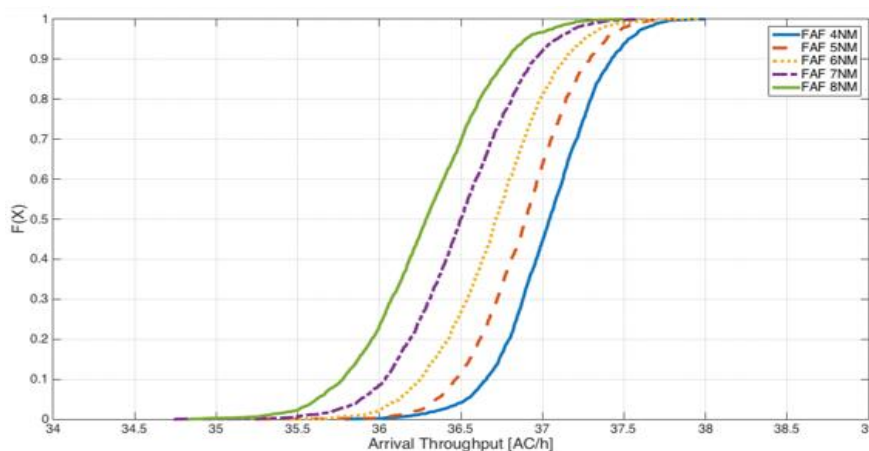
Podle simulací s různými konfiguracemi drah provedenými Technologickým Institutem. Pro konfiguraci se sbíhajícími se dráhami se jedná o průměrný nárůst kapacity o 8,7 % oproti konfiguraci jedné RWY a průměrné navýšení o 41,1 % pro konfiguraci CSPR oproti konfiguraci jedné RWY [13].

2.3 Pojezdové dráhy pro rychlé odbočení

K dosažení maximální kapacity musí být vhodně naplánován počet, umístění a charakter všech TWY. Ty totiž velmi ovlivňují dobu obsazení dráhy letadlem při příletu, který je definován jako časový okamžik mezi přeletem THR dráhy a okamžikem vyklizení RWY (okamžik, kdy se letadlo svou nejzazší částí nachází mimo RWY). Proto se pro redukci času obsazenosti RWY, a tím zvýšení kapacity dráhového systému, konstruují tzv. „rychlodbočky“, což jsou pojezdové dráhy pro rychlé odbočení. Nevýhodou těchto „rychlodboček“ jsou však náklady na jejich výstavbu, které jsou vyšší než náklady na klasické 90° výjezdy [12].

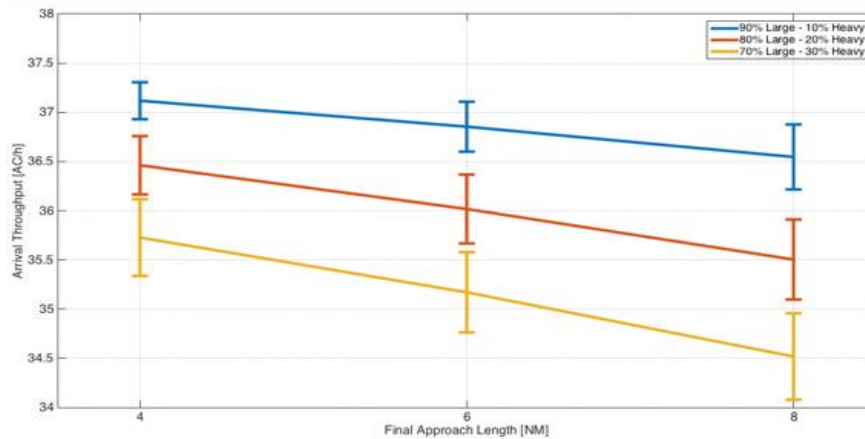
2.4 Délka konečného přiblížení

Délka konečného přiblížení je definována umístěním bodu FAF. Tradiční ILS přiblížení mají délku konečného přiblížení 4 až 8 NM, zatímco některé nové požadované navigačně výkonné (RNP) přiblížení mohou mít i kratší délku [14]. Massachusettský Technologický Institut prováděl měření na různých letištích Spojených států zaměřený na ověřování kapacity drah, jejích faktory a ovlivnění. Podle měření představeném na obrázku 9 klesá průměrná kapacita z 37,1 přiletů za hodinu s 4 NM na 36,3 přiletů za hodinu s 8 NM, což označuje pokles kapacity o 2,2 % [13].



Obrázek 9: Délka konečného přiblížení [13]

Další faktor přítomný na úseku konečného přiblížení je rozdíl mezi skladbou různých kategorií letadel. Čím je větší rozdíl (větší variabilita rychlostí konečného přiblížení), tím citlivější kapacita dráhy na délku konečného přiblížení. Průzkum provedený Massachusettským Technologickým Institutem ukazuje, že kombinace z 90 % Large a 10 % Heavy ovlivní pokles průměrné kapacity dráhy o 1,5 %, když se FAF zdvojnásobí, jak je ukázáno na grafu č. 2. V případě kombinace 80 % Large - 20 % Heavy, průměrná kapacita dráhy klesá o 2,6 % a kombinace 70 % Large - 30 % Heavy sníží kapacitu dráhy o 3,3 %. V případě homogenní skladby provozu neexistují žádné rozdíly v rychlostech přiblížení, a proto má délka konečného přiblížení velmi malý dopad [13].



Obrázek 10: Závislost délky konečného přiblížení na Fleet mixu [13]

2.5 Skladba letadel

Skladba letadel je základním prvkem na letišti, který ovlivňuje jak časové rozstupy mezi letadly pro vzlety, tak i rozstupy založené na vzdálenosti na přiblížení. To všechno ovlivňuje kapacitu dráhy [13]. Z pohledu kapacity je samozřejmě výhodnější, když je složení letadel homogenní, tzn., že se provoz skládá zejména z jedné kategorie letadel a rozstupy jsou vesměs konstantní, a tím pádem je letištní kapacita lépe využita [12].

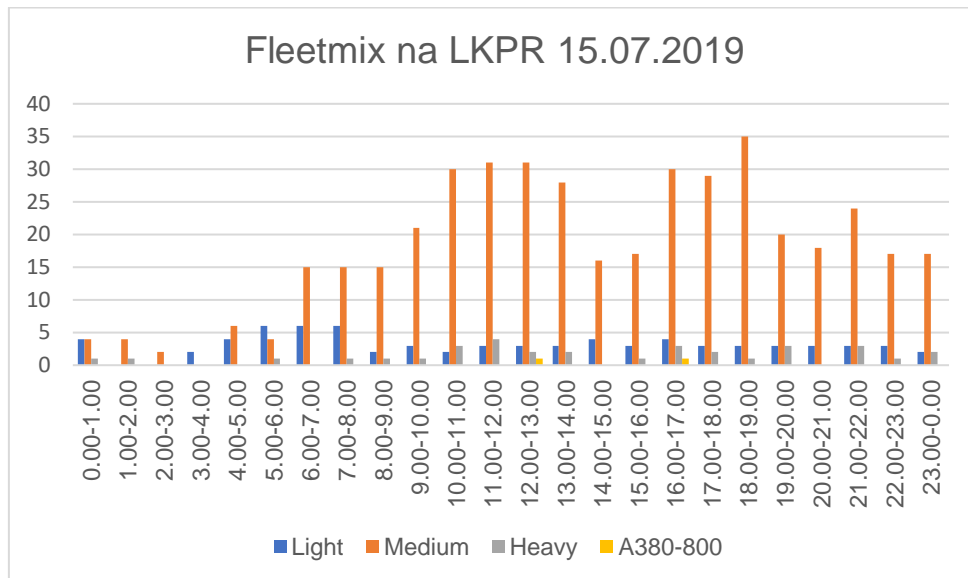
Za prvé, rozstupy záleží na wake-kategoriích letadel. Požadované rozstupy se můžou lišit v závislosti na tom, jaká letadla jsou na letišti provozovaná. Za druhé je to konfigurace velikosti letadla, jeho hmotnosti, klapek a podvozku, což určuje rychlost na konečném přiblížení. Větší letadla obvykle létají při vyšších rychlostech, což umožňuje vyšší výkon, ale často vyžadují delší rozstupy. Navíc významné rozdíly v rychlostech na přiblížení a rozstupy mohou také nepříznivě ovlivnit kapacitu dráhy [13].

Skladba letadel kategorií Medium 100% vede k nejvyšší kapacitě dráhy, po níž následuje 100% skladba Light letadel. Rozdíl příletové kapacity je v tom, že letadla kategorie Medium létají s vyšší rychlostí na konečném přiblížení, jelikož rozstupy pro dvojici Medium – Medium a Light – Light jsou stejné. Letadla kategorií Heavy létají rychleji než ostatní kategorie, ale rozstupy pro přílety a odlety jsou delší, což vede k nižší kapacitě [13].

Sbíhající se dráhy mohou poskytnout významný nárůst kapacity oproti jedné RWY. Pokud se skládá z méně než 30 % Heavy letadel, kapacita sbíhající se dráhy zůstává vyšší než kapacita jedné dráhy. Nicméně když Heavy letadla tvoří 30 % nebo více ve skladbě, má to za následek je dostatečně velký počet dvojic přílet-odlet a odlet-přílet, které vyžadují navíc dvouminutový rozstup. Tyto rozstupy můžou snížit kapacitu v konfiguraci se sbíhajícími se dráhami pod úroveň jedné RWY [13].

Skladba letadel se může měnit po celý den, jelikož letadla různých kategorií proměnlivě provozují lety ráno a odpoledne.

Na obrázku 11 je ukázána skladba letadel na Letišti Václava Havla pro celý den.

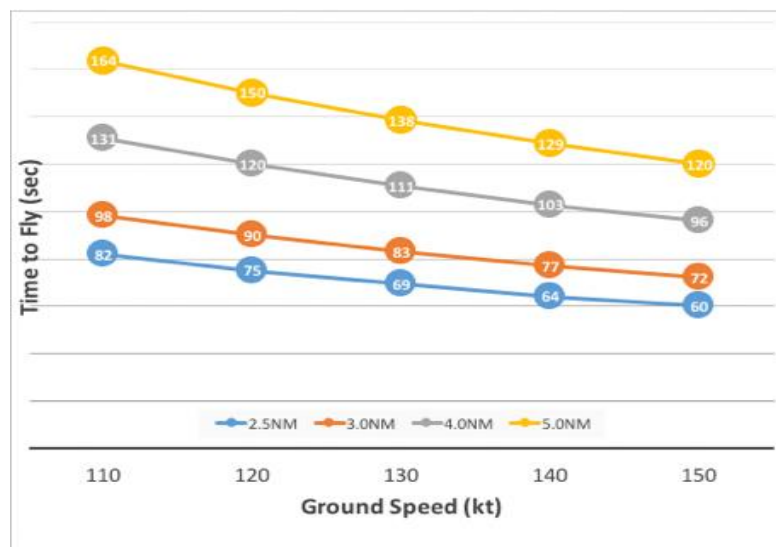


Obrázek 11: Skladba letadel na LKPR 15.07.2019 (zdroj: vlastní zpracování)

2.6 Vítr

Důležitým faktorem výrazně ovlivňujícím kapacitu dráhového systému je boční vítr, pro který jsou stanovené určité limity, které se nesmí překročit. Vlivem větru dochází k časté změně velikosti kapacity, která se v čase mění. Pak lze mluvit o proměnlivosti kapacity dráhového systému způsobené nepříznivými povětrnostními podmínkami. Podmínky větru také ovlivňují rozstupy časově. Pokud je silný vítr, rychlost letadla se sníží. Důsledkem toho je, že letadlům trvá déle proletět určitou vzdálenost než za normálních bezvětrných podmínek. Čím více bude snižovaná rychlost letu, tím více se zvětší úsek časově a přímo to ovlivní i rozstupy, které bude se lišit v závislosti na síle a směru větru kvůli letadlu [13].

Existují dvě řešení pro zmírnění ztráty kapacity RWY v důsledku větru. První je létat s větší rychlostí na přiblížení. Piloti mohou kompenzovat vítr zvýšením přiblížovací rychlosti, a to je speciální zařízení, které často používají řídicí letového provozu. Druhým alternativním řešením je udržení konstantního časového rozstupu mezi letadly na rozdíl od rozstupů založených na vzdálenosti což je TBS koncept (Time-Based Separation) [13].

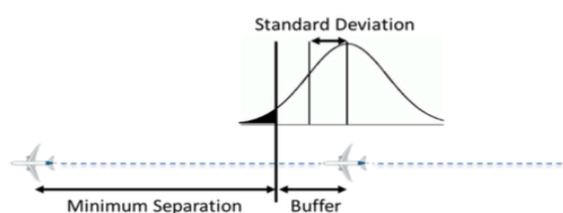


Obrázek 12: Ground Speed [13]

Vítr dává značný vliv pro přistávací letadla, zatímco vzlety to však neovlivní.

2.7 Buffery

Buffery (Separation Buffer) jsou dodatečné rozstupy vyjádřené v distančních jednotkách – většinou jsou to desetiny NM, které se přidávají, aby byla dostačující rezerva zabraňující provozním chybám, a aby se řídicím poskytl větší flexibilita při sekvencování a seřazení letadel na konečném přiblížení. Zvětšení bufferu o 0,1 NM přivede ke ztrátě jednoho přiletu za hodinu. Kromě příletových ztrát buffer oproti situaci s větrem má také vliv na odletovou výkonnost [13].



Obrázek 13: Buffer [13]

2.8 Zkrácené rozstupy mezi letouny Large-Large

Jeden z nejjednodušších konceptů pro optimalizaci rozstupů navrhuje snížení minimálních rozstupů do 2 NM mezi letouny se stejnou wake-kategorií, primárně pro Large kategorii [15]. Koncept předpokládá, že turbulence není faktorem mezi dvojicí kategorií Large, a současný rozstup je většinou omezen časem obsazení RWY. Pokud

mohou být doby obsazení dráhy sníženy na 45 sekund, lze dosáhnout 2NM minima rozstupu. Snížení doby obsazení dráhy může vyžadovat několik rychloodboček [13].

Navíc návrh zkrácených rozstupů mezi Large-Large předpokládá, že i současné intervalové rezervy jsou dost velké. Se zkráceným 2 NM minima rozstupem by letadlo stále létalo nad hranicí dnešních minim. Realizace pravidel zkrácených rozstupů dle turbulence v úplavu mezi Large-Large dvojicí vyžaduje aktuální odkaz na matice rozstupů. Počet hmotnostních kategorií a rozměr matice zůstanou stejné, což znamená, že z hlediska řízení letového provozu lze toto pravidlo poměrně snadno uplatnit. Nicméně 2 NM rozstup znamená, že limitující faktor pro zvýšení výkonnosti RWY se může změnit od rozstupů mezi letadly do obsazení RWY [13].

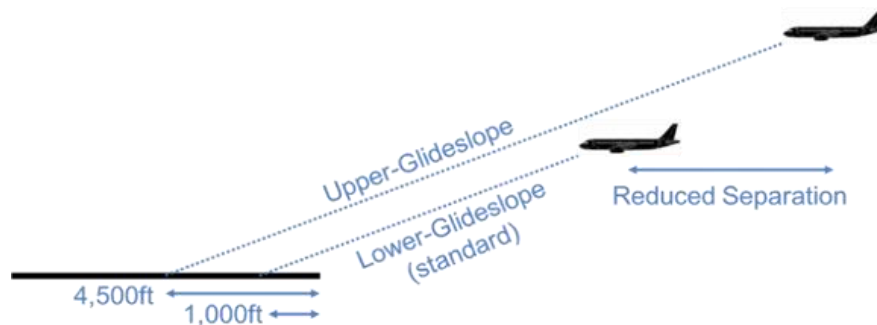
Stejně jako v případě PWS zkrácené Large-Large 2 NM mají rozestupy pouze dopad na příletové pohyby.

Je důležité si uvědomit, že je stejně jako PWS koncept zkrácených rozstupů mezi Large-Large letouny zaleží na krátkodobě obsazené dráze, která se může stát omezujícím faktorem pro mezipříletové rozstupy. Současná minimální vzdálenost radarů v Evropě 2,5 NM (v Praze 3 NM) vyžaduje, aby průměrná doba obsazení dráhy činila 50 sekund nebo méně. Naopak 2 NM rozstup vyžaduje výrazně nižší časy [13].

Dosud nikdy tento koncept nebyl uplatňován kompletně, pouze se aktivně testuje ve Spojených státech.

2.9 Koncepte Dual-Glideslope na přiblížení

Koncepte přistání se dvěma letadly na jednu RWY navrhuje, aby dvě letadla přistála na stejné dráze, přičemž jedno z nich by letělo standardním přiblížením, a druhé by přistálo s přiblížením vyššího glidu [16]. Výhoda je v tom, že rozestup mezi dolním (standardním) letadlem a horním může být významně snížen ve srovnání se stejnými úseky přiblížení, v důsledku vytvářecích vírů od letadla letícím ve předu. Obě skluzové roviny poskytují stejný úhel přiblížení, umožněných systémem (GBAS) [13].



Obrázek 14: Přehled do Dual-Glideslope přiblížení [13]

Letadlo letící dolní sestupovou rovinou postupuje podle standardního přiblížení a dotýká se RWY asi 1000 stop od prahu RWY. Letadla (omezené pouze na kategoriích Small nebo Large) letící v horní sestupové rovině (stejný úhel sklonu) se ale dotýká přibližně 4500 stop od prahu RWY. Rozstup mezi letadly na horní přiblížovací trati a na spodním přiblížení vyžaduje rozstup IFR jedné dráhy plus 1 NM. Standardní rozstupy platí pro letadla A380, 3 NM pro letadla s kategorií Small a Large před letadly kategorií Heavy a 1,5 NM pro zbývající dvojici [13].

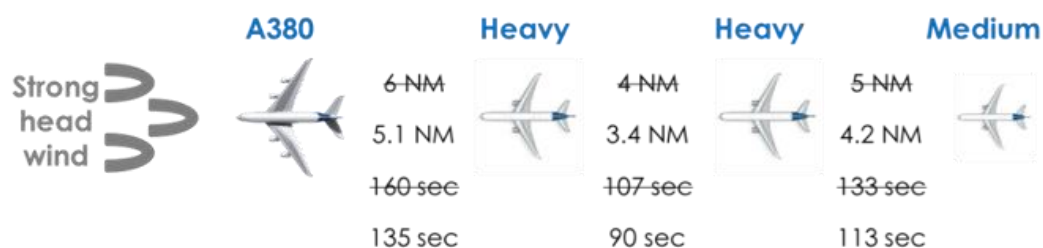
Tento postup vyžaduje, aby přiletová dráha byla dostatečně dlouhá (delší než 8000 stop), aby umožnila přiblížení s horní sestupovou rovinou, kde se letadlo dotýká dolů (4500 stop od prahu). Za další důležitý požadavek je potřeba, aby letiště provádějící Dual-Glideslope procedury bylo vybaveno GBAS systémem.

Podobný koncept s názvem High Approach Landing System (HALS) a Dual Threshold Operations (DTOP) byl v letech 1999 až 2004 testován letišti ve Frankfurtu nad Mohanem (FRA). Výkonnost konceptů HALS / DTOP nebyla projevována, protože řídicí letového provozu nepoužili snížení rozstupů mezi přistávajícími dvojicemi. Letiště FRA postavilo novou paralelní dráhu, a nakonec používání konceptu ukončilo [2].

2.10 Time-Based Separation

Tato myšlenka je spojena s rozestupy založených na základě časů (TBS). TBS může zlepšit konzistenci časových rozstupů mezi letadly na konečném přiblížení tak, že čas mezi přílety se za podmínky s vysokým větrem blíží časovému rozstupu dosaženému během bezvětřných podmínek [17]. Hodnoty TBS jsou založeny na aktuálních hodnotách zaměřených na vzdálenosti s lehkým větrem a rychlostí přiblížení 160 kt (UK – NATS). Například požadované minimální rozstupy mezi A380 a letadly s kategorií Heavy je 6 NM ve Velké Británii. Létání 6 NM za bezvětřných podmínek trvá 135 sekund při 160 kt [13]. Když je silný vítr, stejná vzdálenost bude trvat 160 sekund letu. Pokud se

řídící přepnou z rozstupů založenými distancí na rozstupy založené na časem, použije se 135 sekundový rozstup odpovídající 5,1 NM za bezvětrných podmínek. Nezávisle na podmínkách větru zůstává absolutní minimální rozstup na bázi vzdálenosti 3 NM v absolutním rozmezí platný pro všechny požadavky [13], [18].



Obrázek 15: Snížení rozstupů pomocí využívání TBS pravidel [48]

Časové rozstupy jsou modelovány tak, že když je rychlost větru větší než nula, distanční rozstupy mezi jednotlivými přílety se přepínají na hodnoty časových rozstupů za podmínky nulové rychlosti větru. Proto se při všech rychlostech větru udržované rozstupy mezi přílety a kapacita dráhy se nemění.

Průměrnou ztrátu kapacity dráhového systému o jeden přílet za hodinu lze pozorovat s každým zvýšením rychlosti protivětru o 5 kt na všech letištích. Časový rozstup vede k udržování kapacity RWY, jako kdyby neexistoval žádný vítr a fungovaly by rozstupy založené na vzdálenosti [49].

Když je silný protivítr, rychlost letadla vůči zemi (Ground Speed – GS) je snížena na konečném přiblížení. Z toho plyne protažení času na přiblížení, způsobující další zdržení, a dokonce i zrušení letů. Tento koncept ukazuje, že časové rozstupy nezvyšují kapacitu RWY, ale mohou snížit zpoždění, když letiště pracuje v blízkosti své meze maximální kapacity. TBS je zaměřená na snižování zbytečných časových ztrát na konečném přiblížení za podmínek protivětru. To bude udržovat kapacitu letiště na stejné úrovni za všech větrnostních podmínek [19].

TBS koncept využívá rychlého rozpadu vírů za silného protivětru. Tento fakt udává možnost zkracování vzdáleností mezi letadly na přiblížení. Jako následek mohou na letišti operovat se stejnou kapacitou a s nezměněným počtem příletů jako za bezvětrných podmínek. TBS používá nově tzv. rozhraní člověk/stroj – Human-Machine Interface (HMI) pro dodržení požadovaných minima rozstupů mezi letadly. HMI se upravuje dle potřeb informací o přiblížení pro řídící [19].

TBS přináší obrovské přínosy letištím, leteckým společnostem a cestujícím. Kromě toho:

- Zvyšuje výkonnost, účinnost a efektivitu RWY, na základě zkracování rozstupů mezi letadly od ztracené rychlosti – GS kvůli silnému protivětru, zatímco úroveň bezpečnosti bude stejně zachováván.
- Snížení počtu zdržení, zrušených letů a následně provozních nákladů.
- Kratší celková doba letu.
- Pokroková informace pro řídící, jelikož TBS potřebuje měření profilu větru na úseku konečného přiblížení, a ta informace může být použita řídícími.
- Globální snížení pracovní zátěže díky novému HMI systému [19].

Hlavním požadavkem pro fungování konceptu je zavedení nového nástroje „Air Traffic Controller support tool“ pro podporu řídicích letového provozu.

London Heathrow implementoval TBS v jaře 2015; 16 dalších letišť – London-Gatwick, Paris-Orly, Milan-Malpensa, Frankfurt International, Madrid-Barajas, Amsterdam-Schiphol, Munich Franz Josef Straus, Instambul Ataturk Airport, Rome-Fiumicino, Zurich Kloten, Dusseldorf International, Oslo Gardermoen, Manchester Ringway, Copenhagen Kastrup, Vienna Schwechat, Dublin dopustilo nasazení TBS do roku 2024 (podle EUROCONTROL) [19].

2.11 CSPR procedury

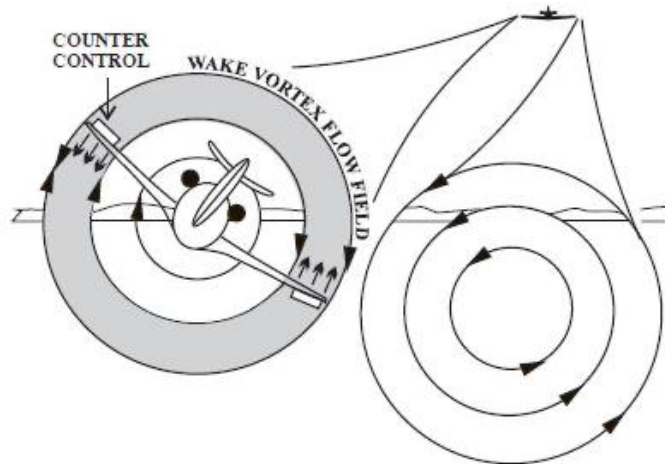
Předcházející letadlo a následující letadlo komunikují prostřednictvím zpráv ADS-B a je zřízena bezpečnostní zóna pro následující letadlo. Pilot následujícího letadla má příkazy na rychlost přes kokpit, aby zůstal v bezpečné zóně po celou dobu paralelního přiblížení. Bezpečná zóna umožňuje snížení rozstupů mezi předcházejícím letadlem a následujícím letadlem, které mohou zvýšit kapacitu RWY. Diagonální rozstup může být až 1,5 míle. Z bezpečnostních důvodů je v některých státech vyžadována nepřetržitá komunikace mezi po sobě jdoucími letadly prostřednictvím zpráv ADS-B [20].

Záleží na skladbě letadel na letišti. V nejlepších případech může koncepce CSPR navyšovat kapacitu 2x. Pařížské letiště CDG provozuje dvě soustavy závislých paralelních drah. Stejně systém CSPR funguje ve Frankfurtu.

3 Význam turbulence v úplavu

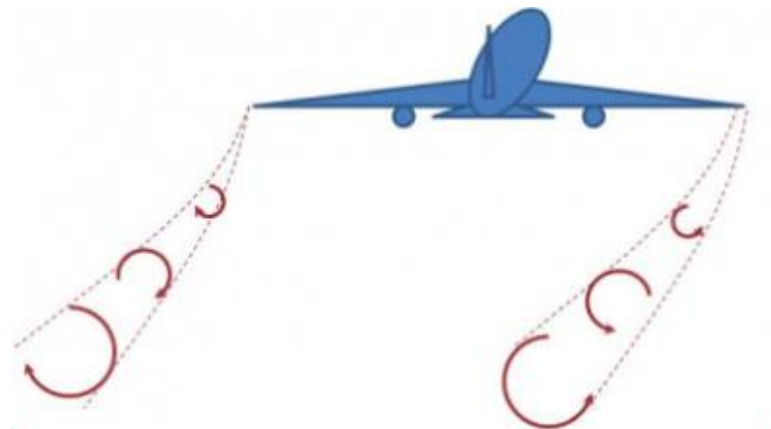
3.1 Turbulence v úplavu

Turbulenci v úplavu lze definovat jako turbulenci produkovanou letounem za letu. Tato turbulence vzniká od okamžiku odlepení kola podvozku od země při vzletu až do doby jeho opětovného dosednutí při přistání, nicméně v praxi vzniká turbulence v úplavu vždy, pokud na křídlo působí vztlak.



Obrázek 16: Proudice popisující oblast turbulence v úplavu [50]

Samotný jev turbulence v úplavu způsobuje vyrovnávání tlaku mezi horní a dolní stranou křídla, kdy toto vyrovnání vytváří rotující víry, které působí proti sobě na koncích křídel. Velikost tohoto působení roste s velikostí letounu, rychlostí letounu, tvaru křídla, tvaru zakončení křídla a případně i konfigurací vztlakové mechaniky. To znamená, že velikost tohoto víru na konci křídla může dosáhnout několik centimetrů, ale i metr v průměru u větších letounů s většími křídly.



Obrázek 17: Turbulence v úplavu [21]

Kvůli vysokým rychlostem se indukované víry na koncích křídel rozpadají velice pomalu a dokáží na daném místě zůstat přibližně po dobu od jedné do tří minut, čímž mohou ovlivnit letoun letící tímto místem za letounem, který vytvořil tyto víry. Nicméně dané víry se na místě vzniku mohou vyskytovat jen krátký moment po vzniku a poté mohou být unášeny okolním větrem směrem dolů, kde po delší době dojde k jejich rozpadu. Doba trvání těchto vírů závisí často na prostředí, ve kterém se vyskytují. Avšak při slabém větru, případně až bezvětří, mohou víry na daném místě setrvat i po dobu pěti minut [21], [22].

3.2 Nehody spojené s turbulenc v úplavu

3.2.1 Nehoda An-2 v Khersonu

K letecké katastrofě došlo 11. srpna 1972 na letišti v Chersonu s letadlem Aeroflot An-2, v důsledku nehody zemřelo 14 lidí včetně pilotů (celkem bylo 17 cestujících - 11 dospělých, 6 dětí a dva piloty). V době srážky mělo letadlo provozní dobu 5037 letových hodin a 12 956 přistání. Letadlo provádělo místní let D-44 z Novoalekseevky do Chersonu a odletělo v 17:40. Při zahájení přiblížení na letišti v Chersonu byla posádka informována ATC o pohybu armádních vrtulníků v blízkosti letišti na jeho východní straně. Ve výšce 20–30 metrů letadlo naklonilo doprava do úhlu 70 °, poté se otočilo doleva a znovu doprava. Po ztrátě kontroly se zastavil a poté havaroval 400 metrů před prahem dráhy 02 [23].

3.2.2 Let American Airlines 587

Let American Airlines 587 byl pravidelný mezinárodní osobní let společnosti American Airlines obsluhovaný letadlem Airbus A300B4-605R, který se v důsledku nesprávných zásahů do řízení dne 12. listopadu 2001 krátce po vzletu zřítil do čtvrti Belle Harbour v americkém New Yorku. Jedná se o druhý nejsmrtečnější letecký incident týkající se letadla Airbus A300[P 1] a o druhou nejsmrtečnější leteckou nehodu v historii USA po letu American Airlines Flight 191 z roku 1979 [24].

3.2.3 Nehoda Yak-40 v Taškentu

Yakovlev Yak-40 společnosti Aeroflot se zřítil krátce po vzletu, který následoval pouhou jednu minutu a patnáct vteřin po vzletu Ilyushinu Il-76. Yak-40 se dostal do úplavu za větším letounem a přešel nekontrolovaně do ostrého pravého náklonu, narazil do země a okamžitě se vznítil. Všech 9 osob na palubě zahynulo [25].

3.2.4 Saab 340 Sydney

3. listopadu 2008 turbulence v úplavu vyvolaná Airbus A380-800 způsobila dočasnou ztrátu kontroly nad letadlem Saab 340 při přiblížení k paralelní dráze za podmínek vysokého bočního větru [26].

3.2.5 Nehoda Robin DR 400 v Německu

9. září 2012 - Robin DR 400 havaroval po otočení o 90 stupňů kvůli turbulenci v úplavu vyvolané předchozím letounem AN-2. V důsledku toho tři lidé zemřeli, jeden byl těžce zraněn [27].

4 Kategorizace letadel – rozvoj a změny

4.1 Kategorizace podle ICAO

Podle dokumentu ICAO-Dokument 4444 – PANS-ATM letadla jsou rozdělována do tří váhových kategorií, podle kterých se stanovují rozstupy mezi letadly za účelem eliminace účinků této turbulence:

- a) TĚŽKÁ (Heavy) – všechny typy letadel o MTOW 136 000 kg nebo větší;
- b) STŘEDNÍ (Medium) – typy letadel o MTOW menší než 136 000 kg, ale větší než 7 000 kg;
- c) LEHKÁ (Light) – typy letadel o MTOW 7 000 kg nebo menší.

Poslední kategorií, která je brána do úvahy, je kategorie:

- d) SUPER (J) neboli Jumbo; do této kategorie v současné době patří pouze letoun Airbus A380-800 [28].

Nicméně kategorie SUPER není zatím zařazena do předpisů ICAO, tudíž jsou zde pouze doporučené rozstupy mezi letounem některé z výše uvedených kategorií a letounem A380-800.

Letadla kategorie turbulence v úplavu "těžká" musí při prvním radiotelefonním spojení se stanovišti ATS použít slovo „těžká“ („Heavy“), a to bezprostředně za volacím znakem letadla. Pro určitá letadla kategorie turbulence v úplavu „těžká“ identifikovaná příslušným úřadem, např. letadlo A380-800, musí při prvním radiotelefonním spojení se stanovišti ATS použít slovo „SUPER“, a to bezprostředně za volacím znakem letadla [29].

Je snadné rozpoznat, že aktuální Medium kategorie definována ICAO je příliš rozsáhlá a zahrnuje v sobě letadla od velikosti Boeing 757 k menším velikostem letadel typu Beech 1900. Rozstupy jsou vždy založené na nejhorším možném případě mezi dvojicí letadel různých kategorií, což vede v mnohých případech k přepočítání rozstupů [13].

Standartní ICAO radarové rozstupy podle turbulencí v úplavu, jsou znázorněny v tabulce 2 následovně:

Tabulka 2: Radarové rozstupy podle turbulence v úplavu dle ICAO

(zdroj: vlastní zpracování dle [29])

Preceding Aircraft	Following Aircraft	Minimum Separation
HEAVY	HEAVY	4.0 NM
HEAVY	MEDIUM	5.0 NM
HEAVY	LIGHT	6.0 NM
MEDIUM	LIGHT	5.0 NM

Zvlášť platí 6NM, 7NM a 8NM rozstupy pro Heavy, Medium a Light následujícími za letadlem A 380-800.

Tabulka 3: Rozstupy založené časem pro odlety (zdroj: vlastní zpracování dle [29])

Předchozí/následující	A380-800	HEAVY	MEDIUM	LIGHT
A380-800			3 min	4 min
HEAVY			2 min	3 min
MEDIUM				3 min

Tabulka 4: Rozstupy založené časem pro přilety (zdroj: vlastní zpracování dle [29])

Předchozí/následující	A380-800	HEAVY	MEDIUM	LIGHT
A380-800		2 min	3 min	4 min
HEAVY			2 min	3 min
MEDIUM				2 min

Tyto rozstupy se používají, pokud letouny používají:

- stejnou vzletovou a přistávací dráhu;
- paralelní vzletové dráhy, které jsou od sebe vzdáleny 760 metrů (2 500 stop) a méně;
- křížující se vzletové a přistávací dráhy a předpokládaná trajektorie letu druhého letounu protíná předpokládanou trajektorii prvního letounu ve stejné nebo v nižší výšce o 300 metrů (1 000 stop);
- paralelní dráhy, které jsou od sebe vzdáleny 760 metrů (2 500 stop) a více a předpokládaná trajektorie letu druhého letounu protíná předpokládanou trajektorii prvního letounu ve stejné nebo v nižší výšce o 300 metrů (1 000 stop) [29].

4.2 Změna kategorizace v ICAO Dokument 4444 (L4444 v ČR) od listopadu 2020

Od listopadu roku 2020 proběhly změny týkající se kategorizace letounů dle turbulence v úplavu. Zavedením nové kategorizace vzniklo 7 nových kategorií A až G (od nejtěžšího k nejlehčímu). Tyto kategorie primárně závisí na maximální schválené vzletové hmotnosti, charakteristikách křídel a rychlostech. Označení skupin je popsáno následovně:

- a) SKUPINA A – typy letadel o hmotnosti 136 000 kg nebo větší a s rozpětím křídel menším 80 m včetně, ale větším než 74,68 m;
- b) SKUPINA B – typy letadel o hmotnosti 136 000 kg nebo větší a s rozpětím křídel menším 74,68 m včetně, ale větším než 53,34 m;
- c) SKUPINA C – typy letadel o hmotnosti 136 000 kg nebo větší a s rozpětím křídel menším 53,34 m včetně, ale větším než 38,1 m;
- d) SKUPINA D – typy letadel o hmotnosti menší než 136 000 kg, ale větší než 18 600 kg, a s rozpětím křídel větším než 32 m;
- e) SKUPINA E – typy letadel o hmotnosti menší než 136 000 kg, ale větší než 18 600 kg, a s rozpětím křídel menším 32 m včetně, ale větším než 27,43 m;
- f) SKUPINA F – typy letadel o hmotnosti menší než 136 000 kg, ale větší než 18 600 kg, a s rozpětím křídel menším 27,43 m včetně;
- g) SKUPINA G – typy letadel o hmotnosti 18 600 kg nebo menší (bez kritéria pro rozpětí křídel) [29].

Se schválením příslušného úřadu ATS mohou být uplatňována minima rozstupů podle turbulence v úplavu s využitím skupin letadel podle turbulence v úplavu, které musí být

založeny na vlastnostech letadel týkajících se vytváření úplavu a odolnosti vůči němu [29].

Je vidět, že nové kategorií A, B a C odpovídají původní kategorií letadel HEAVY podle hmotnostních charakteristik, akorát mají rozdíly podle rozpětí křídel. Další kategorií D, E a F mají stejnou horní hranice hmotnostní charakteristiky jako původní kategorií MEDIUM, akorát dolní hranice je nižší. Poslední kategorie G je jako původní kategorie LIGHT a část letadel z původní kategorie MEDIUM.

Tabulka 5: Nové standardy pro minima vzdálenostních rozstupů podle turbulence v úplavu od listopadu 2020 (zdroj: vlastní zpracování dle [29])

Skupina letadla předchozího	Skupina letadla následujícího	Minima vzdálenostních rozstupů při turbulenci v úplavu
A	B C D E F G	7,4 km (4,0 NM) 9,3 km (5,0 NM) 9,3 km (5,0 NM) 11,1 km (6,0 NM) 11,1 km (6,0 NM) 14,9 km (8,0 NM)
B	B C D E F G	5,6 km (3,0 NM) 7,4 km (4,0 NM) 7,4 km (4,0 NM) 9,3 km (5,0 NM) 9,3 km (5,0 NM) 13,0 km (7,0 NM)
C	D E F G	5,6 km (3,0 NM) 6,5 km (3,5 NM) 6,5 km (3,5 NM) 11,1 km (6,0 NM)
D	G	7,4 km (4 NM)
E	G	7,4 km (4 NM)

4.3 Kategorizace podle FAA

Federální úřad pro letectví Spojených států nepoužívá kategorie rozdělení letadel podle turbulence v úplavu dle ICAO, ale má svůj vlastní systém kategorizace a příslušných rozstupů.

Dle FAA se letadla dle turbulence v úplavu dělí takto:

- a) SUPER kategorie do které v dnešní době spadá Airbus A380 a Antonov An-225.
- b) HEAVY letadla s MTOW 300 000 liber (140 000 kg) a více.

c) LARGE letadla s MTOW větší než 41 000 liber (19 000 kg), ale menší než 300 000 liber (140 000 kg).

d) SMALL letadla s MTOW 41 000 liber (19 000 kg) a méně.

Pro Boeing 757 spadající podle MTOW do kategorie LARGE se používají minimální rozstupy příslušící kategorii HEAVY z důvodu množství incidentů, kdy došlo ke ztrátě kontroly nad řízením u menších letadel při následování B757. To je zapříčiněno specifickou vztlakovou mechanizací tohoto stroje.

Pro vzlety se obecně používá (podobně jako podle ICAO) rozstup nejméně 2 minuty pro letadlo nižší WVC za letadlem vyšší WVC při vzletu ze stejné pozice. Při vzletu z křižovatky se v takovém případě použije rozstup nejméně 3 minuty [30].

Tabulka 6: Rozstupy založené na vzdálenosti pro vzlety podle FAA

(zdroj: vlastní zpracování dle [50])

Předchozí/následující	SUPER	HEAVY	B757	LARGE	SMALL
SUPER	4NM	6NM	7NM	7NM	8NM
HEAVY		4NM	4NM	5NM	5NM
B757			4NM	5NM	5NM
LARGE					4NM

Tabulka 7: Rozstupy založené na vzdálenosti pro přiblížení podle FAA

(zdroj: vlastní zpracování dle [50])

Předchozí/následující	SUPER	HEAVY	B757	LARGE	SMALL
SUPER	4NM	6NM	7NM	7NM	8NM
HEAVY		4NM	4NM	5NM	6NM
B757			4NM	5NM	5NM
LARGE					4NM

4.4 Rekategorizace a jejich plánovaný rozvoj a změny

Cílem re-kategorizace je bezpečné navýšení kapacity letišť předefinováním kategorií turbulence v úplavu a jejich souvisejících minim rozestupů.

V Evropě RECAT-EU dělí ICAO Medium a Heavy kategorii vždy do dvou dalších kategorií a navíc tvoří Super Heavy kategorií pro Airbus A380. V říjnu 2014, po důkladnému projednávání zainteresovaných subjektů a následném podrobném vyhodnocení bezpečnosti, EASA potvrdila, že v případě RECAT-EU bude zajištěna potřebná bezpečnost. První aplikace proběhla v Paříži – Letiště CDG v roce 2015 [9].

V budoucnu se také plánuje rozvoj RECAT-2 a RECAT-3. V současné době se připravuje, že budou definované rozstupy pro každou dvojici letadel vycházející z matice 115 x 115 letadel.

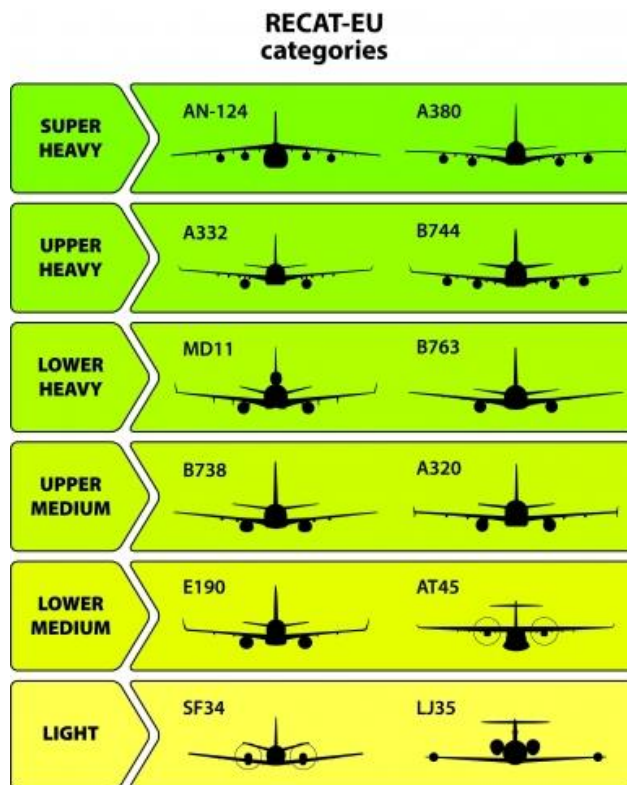
4.4.1 RECAT 1 – RECAT EU

RECAT EU se týká zmenšování bezpečnostních minim rozstupů mezi dvojicí letadel jak ve fázi konečného přiblížení tak na vzletů.

Existence ICAO pravidel rozstupů dle turbulence v úplavu (založených na třech kategoriích – Heavy, Medium a Light) byly zavedeny před více než 40 lety. V některých ohledech jsou tato pravidla dnes už zastaralá a vedou v mnoha případech ke zbytečně velkým rozstupům [21].

Program rekategorizace letadel (RECAT) je společnou iniciativou FAA a Eurocontrolu, i když mají tyto organizace občas odlišné pohledy na pravidla rozstupů. Letadla byla v minulosti roztríděna do různých kategorií na základě MTOW, a byla stanovena minima rozstupů mezi jednotlivými kategoriemi. Tyto rozstupy však mohou být pro některé dvojice letadel příliš konzervativní, a proto existuje možnost ke snížení rozstupů. Tato nová kategorizace letadel je motivací pro RECAT. První fáze RECAT označována jako RECAT EU v Evropě a jako RECAT 1 v USA byla poprvé představena v Memphis v roce 2012. Tato rekategorizace je založená na novém maticovém přístupu viz Tabulka 6 a 7 [13].

Nová evropská rekategorizace dle turbulence v úplavu (RECAT-EU) má mnohem přesnější rozdělení na kategorie letadel než ta klasická ICAO viz Obrázek 11.



Obrázek 18: RECAT-EU [21]

Současné kategorie Heavy a Medium se dělí každá na dvě podkategorie (Upper a Lower), a současně vznikla nová kategorie Super Heavy pro Airbus A380.

RECAT program představuje šest kategorií letadel založených na rozpětí křídel a MTOW a rychlostních profilů, na rozdíl od klasifikačního systému letadel založeného na MTOW. Výsledná kategorizace vypadá následujícím způsobem:

- CAT A - "Super Heavy"
- CAT B - "Upper Heavy"
- CAT C - "Lower Heavy"
- CAT D - "Upper Medium"
- CAT E - "Lower Medium"
- CAT F - "Light"

Podle programu RECAT 1 jsou požadované rozstupy zobrazené v následující tabulce 8 [21].

Tabulka 8: Rozstupy podle RECAT 1 [21]

Leader/Follower	CAT A	CAT B	CAT C	CAT D	CAT E	CAT F
CAT A	3 NM	4 NM	5 NM	5 NM	6 NM	8 NM
CAT B		3 NM	4 NM	4 NM	5 NM	7 NM
CAT C			3 NM	3 NM	4 NM	6 NM
CAT D						5 NM
CAT E						4 NM
CAT F						3 NM

Prázdná políčka znamenají možnost použití minimálních radarových rozstupů.

Pro časové rozstupy na vzletu v tabulce 9 je vidět hodnoty zobrazené v sekundách.

Tabulka 9: Rozstupy založené časem podle RECAT 1 [21]

Leader/Follower	CAT A	CAT B	CAT C	CAT D	CAT E	CAT F
CAT A		100s	120s	140s	160s	180s
CAT B				100s	120s	140s
CAT C				80s	100s	120s
CAT D						120s
CAT E						100s
CAT F						80s

Zavedení RECAT 1 (RECAT EU) bude mít okamžitý přínos (z pohledu kapacity RWY a provozní efektivity) viz body níže:

- RECAT 1 (RECAT EU) bude mít pozitivní vliv pro bezpečnost a kapacitu a může výrazně snížit zdržení na letištích.
- Tvoří přesnější a výkonnější rozstupy, a zároveň zajistí lepší bezpečnost pro velmi malé Medium letadla.
- Kapacita RWY ve špičkových hodinách se můžou zvýšit o 5 % nebo více - zaleží na skladbě provozu letiště.
- Výsledky RECAT ve zkracování celkového času letu pro každé ovlivněné letadlo byly sníženy spotřeby paliva, emise a provozní náklady.
- Kvůli novým efektivním rozstupům, RECAT dovoluje nejenom navýšení kapacity ale i kompenzace ztráty času za nepříznivých podmínek.
- V evropském vzdušném prostoru se předpokládá větší hustota letadel. Očekává se diverzifikace kategorií letadel [13], [21].

4.4.2 RECAT 2 – Pair Wise Separations (PWS)

RECAT 2 nebo také nazývaná jako „Pair Wise Separation“ (PWS) neboli systém přesných rozstupů pro danou dvojici letadel (jeden typ předcházející a druhý typ následující), která může být optimalizována pro menší počet kategorií založených na skladbě provozu každého letiště individuálně. Může být integrován s TBS (Time-Based Separation). Minima rozstupů v této matici jsou progresivnější než předchozí rekategorizace. Matice „Full PWS“ v Evropě zvažuje 96 jednotlivých typů letadel, zatímco matice PWS v USA zvažuje 123 typů letadel. Minima rozstupů PWS založené na vzdálenosti budou stanovena v krocích 0.5 NM. Dalším zlepšením PWS je vygenerováním individuálních matic (tzv. zkrácená matice PWS), založených na lokální skladbě provozu letiště s možností adaptace ke změnám skladba letadel [13].

Toto umožňuje přidání dalších pohybů a částečně odstranění provozních zátěže a zdržení na letiště. Nejvytíženější letiště světa by se měla za dalších 20 let dostat se k přínosům pomocí využití konceptu PWS.

Snížená minima rozstupů podle turbulence v úplavu částečně vykompenzují kapacitní omezení na přistání, což následně zkracuje zdržení ve vzduchu. Kromě tohoto sníženého minima rozstupů pomáhají řídicím letového provozu efektivněji řídit provoz Modernizované Separační Nástroje usnadňují kontrolu rozstupů mezi letadly, a tím snižují pracovní zátěž řídicích ATC.

Zavedení rozstupů založených na konceptu PWS (s HMI) je logickým krokem, následujícím po zavedení TBS (Time-Based Separations). Optimalizace a rozšíření matice z šesti kategorií do PWS matice může poskytnout přínosy letištím, které neprovozuje A380, ale s velkým počtem pohybů bizjetu (business jet) nebo pro skladbu provozu, kde RECAT-EU nepřináší dostačující přínosnosti [31].

Tento koncept stanovuje rozstupy pro jednotlivé typy letadel, na rozdíl od kategorizace podle hmotnosti nebo jiných kategorií. Minimální rozstupy byly výrazně sníženy pro mnohé dvojice letadel. To znamená, že obsazení RWY také může posloužit jako omezující faktor, kde je čas obsazení dráhy těsně spojen s rozstupy, které se podle PWS o hodně zkrátily. Kvůli tomu se přírůstek kapacity výrazně zvyšuje [21], [31].

4.4.3 RECAT 3 – Dynamic Pair Wise Separations (D-PWS)

RECAT 3 je stále v počátečním vývoji, ale předpokládá se, že se jedná o dynamický koncept, při němž se minima rozstupů dynamicky přizpůsobují na základě informací o turbulencích v úplavu v reálném čase, povětrnostním podmínkám a údajům o letadle (hmotnosti a rychlosti). Přestože koncepce RECAT 3 dosud nebyla dokončena, je pravděpodobné, že tento koncept bude sdílet informace o rozestupech na přiblížení nebo na odlety s posádkami letadel [13].

RECAT-3 umožňuje dynamickou úpravu rozstupů mezi letadly, pomocí měření turbulence v úplavu, povětrnostních podmínek v reálném čase a meteorologických dat získaných z pozemních a palubních systémů [13].

Uplatnění D - PWS pro přistání, na konečném přiblížení a pro vzlety bere v úvahu provozní podmínky ovlivňující riziko setkání se s turbulencí v úplavu a charakteristiku dvou letadel (předcházejícího a následujícího) - konkrétně jejich hmotností a rychlostní profily.

Dynamické rozstupy mohou být využívány buď za pomoci Separáčnických nástrojů, jak je vyvinuto pro TBS, WDS (Weather Dependent Separations) – „Rozstupy závislé na počasí“ nebo PWS, anebo to může zastupovat tzv. „Spacing Management“ na palubních systémech. Díky detekce vzdušných vírů prostřednictvím palubních a pozemních systémů, riziko setkání s turbulencí v úplavu je sníženo téměř k nule. Dodání aktuálních informací o turbulenci v úplavu na palubu letadla zvyšuje posádce situační povědomí o reálných podmínkách [13], [31].

V budoucnu se předpokládá, že se letadlo bude schopno automaticky vyhnout prostorům výskytu turbulenci v úplavu.

Počáteční D-PWS vyvíjel v rámci SESAR 1 (2015/2016) a další vývoj je dělán v rámci SESAR 2020 Wave 2 (2018/2020).

Nasazení se předpokládá od roku 2022 pro pozemní systémy a ve druhé fázi pro palubní systémy [31].

5. Provozně technické parametry Letiště Václava Havla

5.1 Infrastruktura letiště LKPR

5.1.1 Technická charakteristika všech RWY na letišti

Letiště Václava Havla má celkem 3 RWY:

- **RWY 06/24:** 3715 x 45 m vybavená pro CAT I (RWY 06) a CAT III B
- **RWY 12/30:** 3250 x 45 m vybavená pro CAT I operations
- **RWY 04/22:** 2120 x 60 m je dlouhodobě mimo provoz a používá se pouze k parkování letadel [32].

Letiště Václava Havla Praha standardně využívá pro většinu provozu hlavní dráhu 06/24 (RWY 06/24) při tzv. západním provozu, kdy vítr fouká ze západních směrů. Dráha je v obou směrech vybavena systémem ILS. V přesně definovaných případech je však řízení letového provozu nuceno využívat tzv. východního provozu, nebo převést část či celý provoz na vedlejší dráhu (RWY 12/30). Dráha 06/24 byla do dubna 1993 značena jako 07/25 a dráha 12/30 do května 2012 jako 13/31. V důsledku změny magnetické deklinace byla označení změněna [33], [34].

5.1.2 Provozní omezení RWY

Vzlet a přistání proudových letadel s maximální vzletovou hmotností vyšší než 7 tun musí být obvykle prováděno od RWY 06/24. Přílety na RWY 12 nebo odlety z RWY 30 jsou také povoleny v čase od 0500 do 2100 (0400-2000) [33].

5.1.3 Pojezdové dráhy na LKPR

Letištěm vedou betonové a asfaltové pojezdové dráhy označené písmeny A–H, K–N, P, R, S, AA, FF a RR. Jejich šířka je 22,5 m, kromě části pojezdové dráhy P, která je široká 40 m [35], [36].

5.1.4 Radionavigační vybavení

V současné době se pro dráhy 06/24 a 12/30 aplikují postupy přiblížení na přistání pomocí navigačních zařízení uvedených v následující tabulce 10 [35].

Tabulka 10: Navigační vybavení na LKPR (zdroj: vlastní zpracování dle [35])

RWY 06	RWY 24	RWY 12	RWY 30
ILS (CAT I, LOC)	ILS (CAT I, II, IIIA, IIIB, LOC)	ILS (CAT I, LOC)	ILS (CAT I, LOC)
NDB/DME	NDB/DME	VOR/DME	VOR/DME
RNAV/GNSS	RNAV/GNSS	RNAV/GNSS	RNAV/GNSS

5.2 Specifické postupy na LKPR

Následující detailnější informace týkající se LKPR byla získána při pohovoru s ATC pracovníky.

Rozstupy mezi přílety jsou rozdělené na různé druhy. Nejzákladnější jsou rozstupy založené na turbulenci v úplavu. Ty se aplikují vždy od země do 5000 ft AMSL, pokud lehčí letadlo letí bezprostředně za letadlem těžším, a vertikálně není zajištěn požadovaný vertikální rozstup 1000 ft, nebo pokud bude lehčí letadlo křížovat trať za těžším a není zajištěn vertikální rozstup 1000 ft.

Nicméně turbulence v úplavu existuje prokazatelně i nad 5000 ft AMSL. Proto je doporučeno dělat tento rozstup i nad touto výškou. Neoptimálnější variantou je vertikální rozstup (ten ale na konečném přiblížení nelze aplikovat).

Další druh rozstupů je radarový. Pokud se nemusí dělat rozstupy dle turbulence v úplavu (stejně kategorie nebo první letadlo lehčí jako druhé), provádí se klasický radarový rozstup. Když se aplikují pouze radarové rozstupy, tak se může užít minimum, které je schválené. V různých státech může být toto minimum různé. Na letišti Václava Havla je minimum 3 NM, pokud jsou splněné podmínky minim turbulence v úplavu. Existují výjimky, pokud je aplikováno vizuální přiblížení, nebo když pracovník ze stanoviště TWR udržuje vizuální kontakt s letadly a má jistotu, že je dodržena bezpečnost, tak může v blízkosti letiště snížit rozstup mezi letadly (minima nejsou definována).

Další věc, která se musí respektovat, je požadavek na rozstupy vydané z věže. Když je příletová špička (v podstatě žádné odlety nebo jen minimum), pracovník ze stanoviště TWR nastavuje do systému požadavek na rozstup 4 NM – což jsou absolutní minima. Požadavek je nutno zajistit ze strany APP do momentu, než první letadlo mine 4 NM

od prahu dráhy. Poté totiž začne první letadlo zpomalovat a zadní ho bude dohánět, výsledkem je, že dojde ke snížení na něco málo přes 3 NM, tudíž je dodržen radarový rozstup. Požadované 4 NM se udržují do 4 NM k dráze a radarové minimum poté až na zem. Když ale letí letadlo, za kterým se mají aplikovat turbulence v úplavu, tak APP musí udělat rozstup větší, jak požaduje pracoviště TWR. Bohužel turbulence v úplavu je více závažná než žádost z věže, takže místo 4 NM udělá pracovník APP 5 NM (Light za Medium), nicméně APP musí zajistit, že 5 NM bude až na zem, a to i přesto, že první letadlo bude na 4 NM od prahu dráhy zpomalovat a zadní ho začne dohánět, pokud nemá nařízenou nižší rychlost. Proto APP udělá určitý buffer navíc, takže například 6 NM do vzdálenosti 4 NM od prahu dráhy, potom dojde ke snížení na něco přes 5 NM. Toto je nadřazené i žádosti z TWR (tj. žádosti na 4 NM).

Když je mokrá RWY, tak si pracovník ze stanoviště TWR může požádat o rozstup 5 nebo i 6 NM, jelikož letadla uvolňují RWY pomaleji a někdy potřebují delší úsek pro brzdění, takže dráha je obsazena delší dobou. Požadavku ze strany TWR musí být vyhověno ze strany APP.

Když se v používání dráha 12, tak se běžně žádají větší rozstupy, protože letadla uvolňují dráhu blízko konce nebo až na konci. Může tedy docházet k rušení ILS. Navíc je dráha obsazena dlouho, takže aby řidičí ze stanoviště TWR nemusel dovídat příkaz k průletu.

Jiná situace nastává, když nastává velké množství odletů. V takovém případě požaduje TWR po APP aplikovat 6 NM rozstup, aby mezi dvojici příletů, dokázal vměstnat odlety. Jelikož mezi přílety a odlety neaplikujeme rozstup „turbulence v úplavu“, tak může odlétávající letadlo zahájit start ihned, jak je RWY volná, nebo má důvodnou jistotu, že dráha volná bude. V případě špatných podmínek si APP zvolí rozstup 7 NM, nebo i 8 NM. Největší rozstupy se aplikují při LVP. Zde se požaduje i 12 NM, nebo až 15 NM.

Procedury aplikované na LKPR:

- Standardně využívaná RWY 06/24.
- Vzlety z RWY 12/30 na vyžádání pilota nebo po domluvě předem.
- Civilní letouny mají vždycky přednost.
- Rozstup 5 NM standardně, 3 NM sníženy za splněním podmínek (povětrnostní, den/noc).
- Časové rozstupy pro vzlety – 2 min stejná kategorie nebo větší za menším, 3 min menší za větším, za SUPER vždy 3 min, Light za Super – 4 min.
- Optimální obsazení stanovišť ATC - 5 pracovníků na (v noci na Delivery nikoho), a vždy je někdo na zálohách.

Další procedura, která se aktivně provozují na letišti LKPR je HIRO (High Intensity Runway Operation) neboli postupy na drahách s vysokou intenzitou provozu.

HIRO se používá k optimalizaci rozstupů mezi letadly na konečném přiblížení za účelem minimalizace doby obsazení dráhy (ROT) pro přistávající i vzletající letadla a ke zvýšení kapacity dráhy. Rychlé vyklizení RWY umožňuje řízení letového provozu (ATC) letadlu přidělit vhodné minimum radarového rozstupu během konečného přiblížení.

Rozstupy příletů budou upraveny v souladu s požadavkem tak, aby co nejefektivněji využily dráhovou kapacitu a snížily zpoždění na odletu. ATC bude považovat každé letadlo na vyčkávací ploše za schopné zahájit vzlet ihned po vydání povolení.

HIRO poskytne z pohledu životního prostředí úspory v podobě sníženého množství paliva a emisí CO₂ a sníženého hluku. To vychází ze zkrácení doby příletu a odstranění zpoždění ve vzduchu a ze zkrácení doby pojíždění při zvýšení propustnosti dráhy [37].

5.3 Plánované projekty na letišti LKPR

5.3.1 Nová paralelní RWY

Pro zajištění dalšího rozvoje letecké dopravy je zapotřebí zvýšit dráhovou kapacitu Letiště Václava Havla Praha, které odbavuje cca 93 % všech cestujících v České republice. Už od 90. let výrazně roste počet odbavených cestujících i letů na Ruzyni. Počátkem roku 2006 byl otevřen nový Terminál 2, který dostatečně navýšil tzv. terminálovou kapacitu pro odbavení cestujících v dlouhodobém horizontu. Naopak dráhový systém letiště se navzdory rychlému růstu objemu cestujících a provozu od 60. let téměř nezměnil. V období provozních špiček tak už nepostačuje a bez dalšího rozšíření bude hlavní překážkou očekávanému růstu civilní letecké dopravy.

Záměr postavit na pražském letišti paralelní dráhu ke stávající hlavní dráze 06/24 není žádnou novinkou. Už při stavbě současné hlavní dráhy 06/24 v 60. letech se počítalo s tím, že v případě potřeby bude dráhový systém paralelní dráhou doplněn. Na počátku 70. let byla tato dráha zapracována do územně plánovací dokumentace.

V roce 2011 získal provozovatel Letiště Václava Havla Praha kladný posudek od Ministerstva životního prostředí České republiky ke studii dopadu na životní prostředí EIA. V současnosti probíhá výběrové řízení na zpracovatele dokumentace pro územní řízení a následné stavební povolení [38].

Ačkoliv se podařilo dostavbou a úpravami postupů zvýšit hodinovou kapacitu o 30 % (z 34 pohybů na 46 s možností navýšit na max. 48 pohybů), současný problém s kapacitou dráhového systému může vyřešit jenom vybudování nové paralelní dráhy.

Paralelní dráha umožní další zvýšení kapacity dráhového systému. Poté se bude jedna dráha používat na přílety a druhá primárně na odlety, čímž se zefektivní provoz v přílehlém vzdušném prostoru. Novou paralelní dráhu budou moci využívat všechna v současné době existující letadla o rozpětí křídel do 80 metrů (stávající dráhy splňují mezinárodní parametry pro letadla o rozpětí do 65 metrů) [39].

5.3.1.1 Pozitivní přínosy s novou paralelní dráhou

- utlumí provoz na vedlejší dráze, jejíž využívání zatěžuje hlukem na desítky tisíc obyvatel Prahy a Kladenska;
- umožní efektivnější a k životnímu prostředí šetrnější provoz na dvou souběžných drahách;
- usnadní rozvoj cestovního ruchu v České republice a tím zvýší poptávku v terciární sféře – ubytování, stravování, maloobchod, kultura atd.;
- umožní i nadále uspokojovat poptávku cestujících po letecké dopravě;
- její vybudování a následné zprovoznění podpoří zaměstnanost v regionu Prahy a Středočeského kraje a přispěje do veřejných rozpočtů [38].

5.3.1.2 Parametry dráhy

Stavební délka dráhy:

- 3 100 m.

Stavební šířka dráhy:

- 45 m (s nejvyšší únosností);
- 60 m (základní);
- 75 m (včetně postranních pásů).

Pás dráhy:

- délka 3 220 m;
- šířka 300 m.

5.3.1.3 Provozní status

- RWY 06R přístrojová dráha pro přesné přiblížení III.B kategorie;

- RWY 24L přístrojová dráha pro přesné přiblížení III.B kategorie.

5.3.1.4 Vozovka

Konstrukce vozovky v místech extrémního namáhání bude tuhá s cementobetonovým povrchem. V ostatních místech bude použit živičný povrch. Ochranná vrstva bude tvořena štěrkopískem, podkladní vrstvy štěrkodrtí a cementovou stabilizací, kryt bude cementobetonový nebo asfaltobetonový. Celková tloušťka konstrukce bude přibližně jeden metr [40].

5.3.1.5 Umístění

Nová dráha nahradí stávající dráhu 04/22, která je dlouhodobě mimo provoz a používá se pouze k parkování letadel. Dráha bude rovnoběžná se stávající dráhou RWY 06/24 ve vzdálenosti 1525 m, aby byl umožněn nezávislý provoz na obou drahách. Provoz na dráze 12/30 bude a dráha bude začleněna do systému pojezdových drah. Tato úprava přinese významný benefit pro obyvatele Prahy a Kladna v podobě zrušení provozu přes tyto hustě obydlené oblasti [40].

5.3.1.6 Technické vybavení

Radionavigační vybavení nové dráhy je navrženo tak, aby umožňovalo přiblížení a přistání letadel v obou směrech dráhy i za nepříznivých meteorologických podmínek, respektive i za nulové viditelnosti bez manuálních zásahů posádky. Dráha je navíc navržena tak, aby vyhovovala i letadlům Airbus A380 nebo Boeing B747 [40].

5.3.2 Řídicí věž

Kromě paralelní dráhy je plánovaná výstavba i nové řídicí věže, která má díky své vyšší výšce zajistit lepší výhled řídicím. Podle plánu měla začít stavba v, roce 2021 a uvedena do provozu o dva roky později. Počítá se, že její výška bude asi 75 metrů, tedy o 30 metrů více než má současná věž. Ta nebude zbourána, ale využije se jako testovací a záložní pracoviště [41].

6 Úprava postupů s využitím nových přístupů k minimům rozstupů turbulence v úplavu

V teoretické části bakalářské práce byla představena celá řada metod a konceptů založených na zkracování rozstupů mezi letadly jak ve fázi konečného přiblížení, tak i na odletech. Aby mohl být vytvořen model, jehož by výstupem byly dopady využívání

jednotlivých konceptů, bude předtím potřeba popsání reálného neboli současného stavu letiště.

6.1 Postup řešení

Zprv bylo provedeno týdenní měření prostřednictvím neustálého pozorování a vedení záznamu všech příletů a odletů z aplikace Flight Radar (viz elektronická příloha v Excelu "měření a výpočty"). Aby bylo v analyzovaném úseku co nejvíce pohybů, byla zvolena špičková sezona pro Letiště Václava Havla – 14.07.2019 až 20.07.2019, kdyby hustota provozu dosahovala špičkových hodnot.

Všechna přilétávající a odlétávající letadla byla rozdělena podle standardů ICAO do třech hmotnostních kategorií – Heavy „H“, Medium „M“ a Light „L“. Do záznamu taky patřil speciální případ pro A380-800 označované písmenem „J“ podle turbulence v úplavů. (standarty ICAO, které byly aplikované do listopadu 2020, viz kapitola 4 „“). Následně z naměřených dat byly odstraněny všechny pohyby letadel mimo hlavní RWY (06/24). Důvodem je, že se neaplikuje turbulence v úplavu na vedlejší RWY (12/30), jak bylo vysvětleno při pohovoru s pracovníkem ATC Praha.

Dále z celkově naměřených dat byly zvoleny čtyři nejvytíženější hodiny pro přílety a odlety. Každý pohyb (odlet/přílet) byl zaznamenán s přesností na minuty. Pro analýzu přínosů byly zavedeny dva alternativní scénáře navíc. První scénář ukazuje nejlepší případ uspořádání letadel – tj. tak, aby z hlediska drahového systému byla využívána maximální kapacita a turbulence v úplavu by se aplikovala jen v minimálních případech kvůli neefektivnějším kombinacím uspořádání letadel. Druhý scénář je opačný – případ nejhoršího uspořádání pohybů (vzletů a přistání) na letiště, aby dráhový systém byl ovlivněn rizikem turbulenci v úplavu v největší míře.

Po vyhotovení třech možných scénářů (nejhorší, reálný a nejlepší) byly zjištěny přidělené rozstupy za předpokladu stejné skladby letadel v každé simulované hodině. Následně byla vypočítána tzv. „rezerva času“ za každou analyzovanou hodinu (viz tabulka 11). Pro tento výpočet byl použit vzorec:

$$t = 60 - t_n + \sum_{k=1}^n (t_k - t_{k-1})$$

kde **t** – je tzv. rezerva času

n – počet pohybů za měřenou hodinu

t_k – minuta, ve kterou byl zaznamenán konkrétní pohyb v pořadí (od prvního k poslednímu pohybu) „n“ zaznamenaný Flight Radarem.

t_n – minuta, ve které byl zaznamenán poslední pohyb „n“ za měřenou hodinu

t_0 – nulová hodnota označující začátek měřené hodiny

Tabulka 11: Vypočítané časové rezervy (zdroj: vlastní zpracování)

	Reálný scénář	Nejhorší scénář	Nejlepší scénář
14.07.2019 (17:00-18:00)	15 min	13 min	20 min
15.07.2019 (11:00-12:00)	17 min	15 min	22 min
16.07.2019 (11:00-12:00)	14 min	11 min	20 min
17.07.2019 (12:00-13:00)	12 min	10 min	20 min

Následně byly vyhotoveny dvě tabulky se všemi výsledky (viz tabulka 24 a tabulka 25, kapitola 6.4). Tabulka 24 je ve „výpočtovém tvaru“ a ukazuje přínosy vyjádřené v námořních mílích (NM) a časových jednotkách (sekundy a minuty). Výsledky jsou většinou ve formě intervalů. Tabulka 25 je ve „statistickém tvaru“ a ukazuje, o kolik letadel se může přidat/snížit za hodinu a procentuální vyjádření přírůstků. Každý koncept byl aplikován na všechny tři scénáře (nejlepší, nejhorší, a reálný podle Flight radaru).

Pro výpočet maximální pohybové propustnosti dráhového systému LKPR pro dráhu 06/24 byl použit následující vzorec:

$$k_{MAX} = p \times \left(1 + \frac{t}{T - t} \right)$$

kde k_{MAX} – maximální pohybová propustnost dráhy 06/24

p – počet pohybů za měřenou hodinu

t – rezerva času (viz předchozí vzorec)

T – hodina (60 min)

Pro zvolené hodiny měření podle vzorce byly vypočítány následující hodnoty maximální propustnosti, které jsou znázorněny v tabulce 12.

Tabulka 12: Vypočítaná maximální propustnost pro dráhu 06/24 za podmínky ICAO,
(zdroj: vlastní zpracování)

	Reálný počet pohybů za hodinu (p) [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro reálný scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejhorší scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejlepší scénář [pohybů/hod]
14.07.2019 (17:00-18:00)	41	54	52	61
15.07.2019 (11:00-12:00)	39	54	52	61
16.07.2019 (11:00-12:00)	41	53	50	61
17.07.2019 (12:00-13:00)	41	51	49	61

Podle tabulky 12 je vidět, jaká může být maximální možná propustnost ve všech scénářích. Například kdyby byla využívána časová rezerva, celkem by to pro reálný scénář znamenalo navýšením maximálně o dalších 13 pohybů. Co se týče hodnot maximální propustnosti, pro „nejlepší scénář“ je to spíše ideální model (tj. kdyby provoz fungoval ideálně a nepřetržitě za splnění všech podmínek, dostačujícího počtů „rychloodboček“ kvůli potřebám rychlejšího vyklízení RWY pro následující letadlo bez žádných omezení, zdržení a chyb).

Podobným způsobem byla provedena analýza s vybranými koncepty vhodnými pro LKPR.

Finálním krokem praktické části bylo navržení vlastní matice pro všechny kombinace dvojice letadel provozovaných na Letišti Václava Havla (jde v podstatě o vlastní zkrácenou PWS matici uzpůsobenou pro konkrétní skladbu letadel na LKPR).

6.2 Měření a zpracování dat

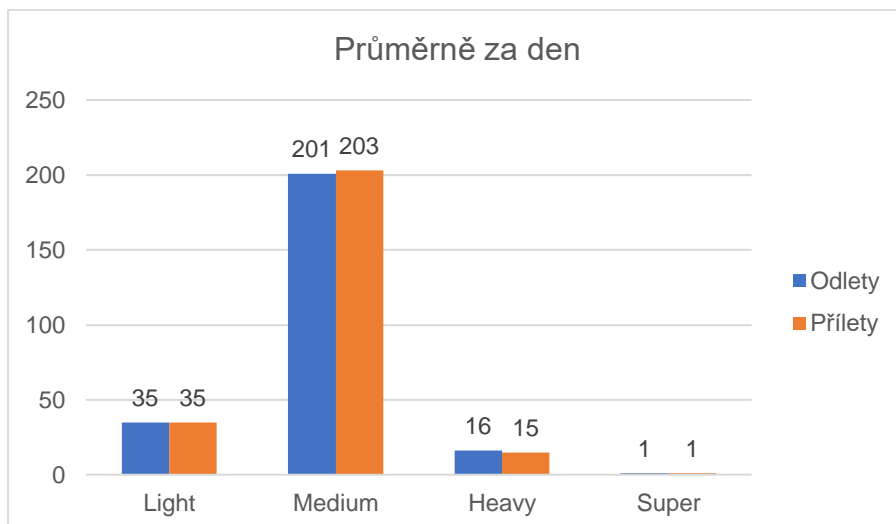
Sledováním provozu v aplikaci Flight Radar byly postupně zaznamenávána všechna letadla včetně jejich typů, kategorií podle turbulencí v úplavu, a to jak standartních ICAO kategorií, tak i alternativní značení podle FAA (viz kapitola 4.3).

Dalším krokem bylo odstranění zbytečné informace. Pokud pracujeme primárně s hlavní dráhou, ostatní přílety/odlety mimo RWY 06/24 nebyly pro další zpracování dat použity. Podle známých kategorií naměřených letadel byl vytvořen graf (viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“) ukazující skladbu letadel na Letišti Václava Havla. Pomocí zaznamenaných časů všech pohybů vzniká další graf (viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“), ve kterém je vidět, jak se mění skladba letadel v průběhu času zvlášť pro přílety/odlety a dohromady (přílety a odlety), a to jak pro jednotlivé dny, tak i pro celou dobu měření. Následně byly rozpracovány týdenní grafy pro každou hmotnostní kategorii zvlášť (viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“). Tyto grafy ukazují, v jakých časových rozmezích a jaké kategorii jsou využívány na letišti v průběhu měření.

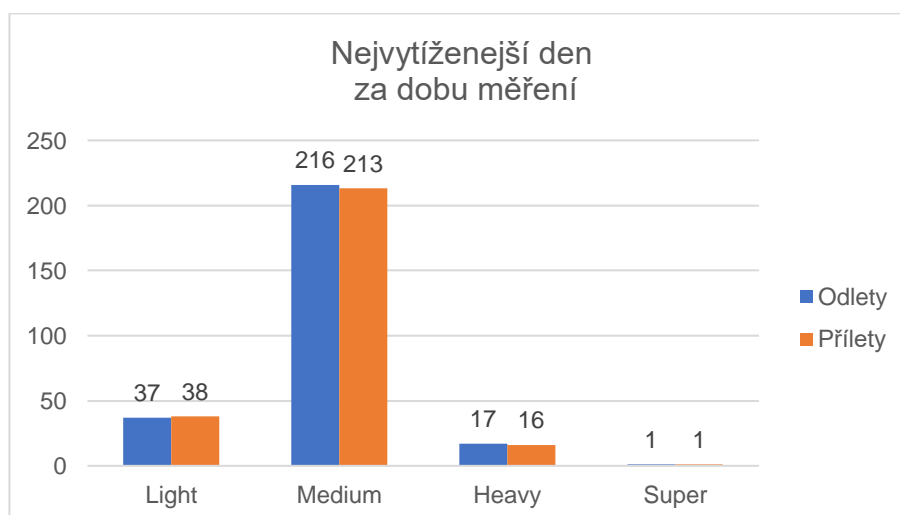
6.3 Uplatňování různých konceptů na Letišti Václava Havla

Letiště Václava Havla má nepřetržitý provoz a nejvytíženější sezona je letní, kdy počet destinací a tím i počet pohybů na letišti je značně vyšší než průměrný. Systém HIRO pomáhá bezpečně udržovat a v některých případech i navyšovat kapacitu dráhového systému na LKPR. Tendence před COVID-19 vedla k růstu počtů pohybů [53]. Proto na základě získaných informací od pracovníka ŘLP (diskutování s koordinátory a řídicími letového provozu) v roce 2019 bylo zaznamenáno ve špičkových hodinách kolem 50–60 pohybů za hodinu, díky čemuž vznikly komplikace z hlediska turbulenci v úplavu. Cíl praktické části spočíval v detailním prozkoumání aktuálních naměřených dat a posouzení nových konceptů snížení minim rozstupů dosud neaplikovaných na letišti LKPR. Dalším krokem je srovnání každého konceptu s dnešním provozním stavem a posouzení přínosnosti a realizace uplatnění jednotlivých konceptů.

Podle získaných dat z aplikace Flight Radar a jejich postupným zpracováním lze na obrázku 19 vidět, že průměrně za den v letní sezoně za dobu měření bylo nejvíce pohybů letadel kategorií Medium (201 odletů/203 příletů), zatímco nejméně výskytů bylo u typu letadel A380-800 (1 přílet/1 odlet). Podobnou skladbu provozu lze vidět v případě nejvytíženějšího dne měření (15.07.2019) na obrázku 20.



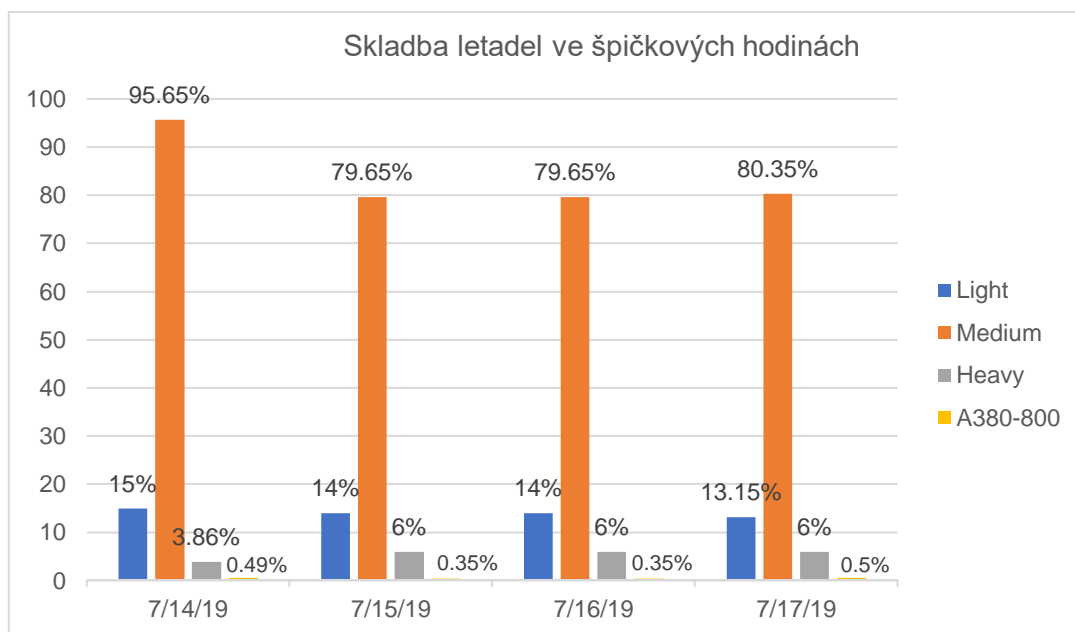
Obrázek 19: Průměrná skladba letadel za den (zdroj: vlastní zpracování)



Obrázek 20: Skladba letadel v nejvytíženější den (15.7. 2019)

(zdroj: vlastní zpracování)

Podle obrázku 21 je vidět, jak vypadá skladba letadel na Letišti Václava Havla. Nejpoužívanější kategorie na LKPR je Medium. Druhá kategorie letadel, která se nejvíce vyskytuje, je Heavy. A380-800 (aerolinie Emirates) létá standardně pouze jednou denně, což má za následek nejmenší výskyt na LKPR. Light letadla jsou většinou provazovaná na vedlejší RWY 12/30.



Obrázek 21: Skladba letadel ve špičkových hodinách na LKPR

(zdroj: vlastní zpracování)

Jak bylo zmíněno v teoretické části (viz kapitola 2), čím je homogennější skladba provozu, tím méně komplikací se zdržením na letišti, a tím méně se aplikují rozstupy dle turbulence v úplavu. Pražské letiště má relativně homogenní skladbu letadel (primárně Medium kategorie), viz obrázky 19 až 21.

Podle naměřených dat jsme zvolili čtyři nejhorší hodinové situace a podle reálné skladby provozu jsme vytvořili tři různé hypotetické scénáře. První je reálný scénář, který byl naměřen z Flight Radaru. Druhý scénář je „nejlepší seřazení letadel“, kdyby mezi dvojicí letadel skoro vůbec neaplikovaly rozstupy dle turbulence v úplavu kvůli vhodnému řazení letadel (od nejlehčího k nejtěžšímu). Dá se říct, že reálný provoz skoro nikdy nebude vycházet podle nejlepšího scénáře, spíše naopak. Jak bylo ověřeno, reálný stav je lehce pod nejhorším scénářem. Tento scénář byl vytvořen pro přehled možných variant a zjištění největší tzv. „rezervy dráhy“. Nejhorší scénář se projevuje největší možnou aplikací rozstupů dle turbulence v úplavu. Proto byla potřeba namíchat všechna letadla (z dané hodiny) pro nejhorší dopad, kde jsou kombinována lehčí letadla za těžší.

V kapitole 6.1 je znázorněno porovnání těchto scénářů. Výsledky z tabulky č. 11 ukazují rezervu RWY vyjádřenou v jednotkách času – minutách, které byly spočítané na základě součtů všech „volných“ minut za hodinu mezi pohyby neomezené turbulencí v úplavu (viz vzorec pro výpočet rezervy času „t“) v souladu s ICAO minimy rozstupů (viz tabulky 3 a 4, kapitola 4).

Podle výpočtů je vidět, že za podmínky seřazení podle „nejlepšího scénáře“ by teoreticky získaná „celková rezerva dráhy“ odpovídala přidáním dalších dvou pohybů za hodinu (výjimka je 17.07.2019, kde se dají přidat další 3 pohyby). Nejhorší kombinace seřazení letadel má za následek zhoršení současného stavu odpovídající ztrátě jednoho pohybu za hodinu pro každý měřený čas.

6.3.1 Přínosy z konceptu RECAT-EU

RECAT-EU je koncept, která se aktivně využívá na mnohých evropských letištích. Pokud by se aplikoval na letišti LKPR, jak je znázorněno v tabulkách 13 a 14, nebudou zde značné přínosy, jak bylo očekáváno. V „reálném“ a „nejlepším“ scénáři přináší tento koncept většinou ztrátu jak v časové, tak ve vzdálenostní rezervě.

Dne 14.07.2019 aplikování tohoto scénáře mělo za následek ztrátu 20 vteřin na odletech v reálném scénáři a ztrátu 20 až 40 vteřin na odletech za podmínky „nejlepšího“ seřazení.

Už je vidět, jak 15.07.2019 tento koncept pozitivně ovlivňuje reálný scénář přidáním o 2 NM rezervní kapacity na přistání, což je neúplná rezerva pro jedno letadlo (minima radarový rozstup je 3 NM pro Letiště Václava Havla) ale zároveň odebralo 20 vteřin na odletech. Pro „nejlepší“ scénář navýšilo o 0 až 1,5 NM rezervní kapacity na přistání, což je také pouze poloviční rezerva pro jedno letadlo a odebralo 40 vteřin na odletech.

16.07.2019 neovlivnilo reálný scénář a odebralo 20 vteřin na odletech pro „nejlepší“ scénář.

17.07.2019 se pro současný scénář přidalo o 1 NM pro přistání, což je miň než rezerva pro jedno letadlo a je žádný vliv pro „nejlepší“ seřazení.

Koncept RECAT-EU pro letiště LKPR neměl jenom ztráty, ale prokázal i přínosy. Je zajímavé, že přínosy se objevili většinou pro „nejhorší“ scénář. Tedy 14.07.2019 se přidalo 20 až 80 vteřin na odletech, což je docela značný výsledek oproti minulým dopadům a zároveň se přidala 1 NM pro přistání.

15.07.2019 se přidalo 20 vteřin na odletech a zároveň se přidalo 0 až 5 NM pro přistání, což odpovídá rezervě pro jedno až dvě další letadla navíc.

16.07.2019 se přidalo 60 vteřin na odletech a zároveň se přidalo 2 až 3 NM pro přistání, což je v podstatě rezerva odpovídající jednomu letadlu navíc.

Pro 17.07.2019 se přidaly 4 NM pro přistání (o 1 letadlo navíc).

Tabulka 13: Přínosy RECAT-EU pro LKPR (zdroj: vlastní zpracování)

		RECAT-EU		
		Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
14.07.2019		< 20 - 80 > s	20 s	< 20 - 40 > s
17:00-18:00		+ 1NM	+0NM	+0NM
		Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
15.07.2019		20 s	20 s	40 s
11:00-12:00		< 0 - 5 > NM	+ 2 NM	< 0 - 1,5 > NM
		Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
16.07.2019		60 s	+ 0s	< 0 - 20 > s
11:00-12:00		<+ 2NM; +3 NM>	+ 0NM	+ 0 NM
		Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
17.07.2019		+ 0 s	1 NM	+ 0 s
12:00-13:00		4 NM	+ 0 s	+ 0 NM

Když sečíst přínosy/ztráty z výsledků RECAT-EU ukázané v tabulce 13 s „časovými rezervami“ z tabulky 11, pak dostaneme celkovou rezervu pro každý případ následovně:

$$R_c = t_{ICAO} + t_{RECAT-EU} + d_{RECAT-EU}$$

Kde R_c – celková rezerva dráhy

t_{ICAO} – časová rezerva za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách viz tabulka 11)

$t_{RECAT-EU}$ – přínosy/ztráty pro časovou rezervu za podmínky RECAT-EU (vyjádřená v sekundách viz tabulka 13)

$d_{RECAT-EU}$ – přínosy/ztráty pro vzdálenostní rezervu za podmínky RECAT-EU (vyjádřená v námořních mílích viz tabulka 13)

Dále pro výpočet maximální propustnosti dráhového systému pro každou měřenou hodinu ve všech scénářích byl použit vzorec:

$$k_{MAX(RECAT-EU)} = p \times \left(1 + \frac{t_{ICAO} + t_{RECAT-EU}}{60 - (t_{ICAO} + t_{RECAT-EU})} \right) + \frac{d_{RECAT-EU}}{r}$$

Kde $k_{MAX(RECAT-EU)}$ – maximální propustnost dráhového systému za měřenou hodinu (za podmínky RECAT-EU)

p – počet pohybů za měřenou hodinu (viz tabulka 12)

t_{ICAO} – časová rezerva za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách viz tabulka 11)

t _{RECAT-EU} – přínosy/ztráty pro časovou rezervu za podmínky RECAT-EU (vyjádřená v sekundách viz tabulka 13)

d _{RECAT-EU} – přínosy/ztráty pro vzdálenostní rezervu za podmínky RECAT-EU (vyjádřená v námořních mílích viz tabulka 13)

r – standardní radarový rozstup (5 NM)

Tabulka 14: Vypočítaná maximální propustnost pro RECAT-EU koncept,
(zdroj: vlastní zpracování)

	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejhorší scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro reálný scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejlepší scénář [pohybů/hod]
14.07.2019 (17:00-18:00)	53-54	54	60
15.07.2019 (11:00-12:00)	52-53	54	60-61
16.07.2019 (11:00-12:00)	50-51	53	61
17.07.2019 (12:00-13:00)	50	51-52	61

Výsledná tabulka 14 ukazuje maximální možnou propustnost pro všechny scénáře, když by byl uplatněn koncept RECAT-EU. Výsledky označované zelenou barvou ukazují přínosy pro kapacitu kvůli snížených minim rozstupů dle turbulence v úplavu. Červená barva označují ztráty z použití koncept.

I když to není tak vhodný koncept pro Letiště Václava Havla kvůli novým omezením pro Light letadly viz tabulka 13 (20-ti a 40-ti vteřinové ztráty), RECAT-EU nelze považovat za nepřínosný. Tento koncept dokáže částečně až úplně vykompenzovat ztráty při „nejhorších“ dopadech seřazení skladby letadel (viz tabulka 14).

6.3.2 Přínosy z konceptu PWS

Před tím než se pustit do analýzy výsledků uplatnění konceptu PWS na letišti LKPR, stojí za to zmínit, že úplná matice rozstupů PWS se nedá nikde získat. Přínosy byly již ukázány v tabulce 15, ale nejsou kompletní. (Jsou ohodnoceny jenom přínosy, jež se

podářilo použit z matice, která byla k dispozici neboli ze zkrácené matice rozstupů podle PWS viz obrázek 22).

Jak je vidět z výsledků, většinou to dává přínosy pro přistání a žádné ztráty oproti RECAT-EU. Ale také se jedná většinou o přínosy pro „nejhorší“ scénář.

Co se týče přínosů pro reálný scénář:

15.07.2019 se přidaly pro přestání 2,5 NM (rezerva odpovídající skoro jednomu letadlu).

17.07.2019 se přidala jenom 1 NM také na přistání.

Pro scénáře s „nejlepším“ seřazením se přidalo o 1,5 NM pro přistání 15.07.2019.

Pozitivněji to dopadlo pro „nejhorší“ scénář.

Dne 14.07.2019 se přidalo dalších 30 až 90 vteřin na odlety, a zároveň se přidalo 0 až 1 NM pro přistání.

15.07.2019 se přidalo 10 až 30 vteřin na odlety a zároveň 4 až 6 NM pro přistání, což v podstatě odpovídá jednomu až dvěma letadlům navíc.

16.07.2019 se přidalo 20 až 80 vteřin na odlety a zároveň 2 až 3,5 NM pro přistání, což je o letadlo navíc.

Následně 17.07.2019 se přidalo 3,5 až 6 NM pro přistání, což v podstatě odpovídá jednomu až dvěma letadlům navíc.

Jako koncept RECAT-EU, PWS koncept přináší benefity většinou jen pro nejhorší scénáře. Může kompenzovat ztrátu času kvůli nejhorší kombinaci uspořádání letadel.

RECAT-2 – Pair Wise Separations currently under EASA review

	B739	B738	B737	B736	A321	A320	A318	A319	MDO83	MDO2	A148	B734	B733	B735	E190	G550	G650	G655	B712	F100	F70	B463	ROLH	R035	EL10	CUJ7	CR9	GLF4
A388	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
B77L	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
B77W	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
A351	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
A359	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
A358	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
B744	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
A346	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
A345	3.5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
B773	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
B772	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
A383	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
A332	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
A333	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
A342	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
B788	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
MD11	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4	4	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
B764	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3	3	3	3	3.5	3.5	3	3	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
B762	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3	3	3	3	3.5	3.5	3	3	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
B763	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3	3	3	3	3	3.5	3.5	3	3	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
A306	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	3	3	3	3	3.5	3.5	3	3	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
A308	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	3	3	3	3	3.5	3.5	3	3	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
A310	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	3	3	3	3	3.5	3.5	3	3	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
B752	1.5	1.5	2	2	2	2	2	2	2	2	2.5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
B753	1.5	1.5	2	2	2	2	2	2	2	2	2.5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

Obrázek 22: PWS matice minim rozstupů [31]

Tabulka 15: Přínosy PWS pro LKPR (zdroj: vlastní zpracování)

PWS STATIC			
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
14.07.2019	<+ 30 s; + 90 s>	+ 0 s	+ 0 s
17:00-18:00	<0; + 1 NM>	+ 0NM	+ 0NM
15.07.2019	<+ 10 s; + 30 s>	+ 0 s	+ 0 s
11:00-12:00	<+4 NM; + 6 NM>	+ 2,5 NM	+ 1,5 NM
16.07.2019	<+ 20 s; + 80 s>	+ 0 s	+ 0 s
11:00-12:00	<+2 NM; + 3,5 NM>	+ 0NM	+ 0NM
17.07.2019	+ 0 s	+ 0 s	+ 0 s
12:00-13:00	<+3 NM; + 5,5 NM>	+ 1 NM	+ 0NM

Když sečíst přínosy z výsledků koncepce PWS ukázané v tabulce 15 s „časovými rezervami“ z tabulky 11, pak celková rezerva pro každý případ se počítá následujícím vzorcem:

$$R_c = t_{ICAO} + t_{PWS} + d_{PWS}$$

Kde R_c – celková rezerva dráhy

t_{ICAO} – časová rezerva za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách viz tabulka 11)

t_{PWS} – přínosy pro časovou rezervu za podmínky PWS (vyjádřená v sekundách viz tabulka 15)

d_{PWS} – přínosy/ztráty pro vzdálenostní rezervu za podmínky PWS (vyjádřená v námořních mílích viz tabulka 15)

Dále pro výpočet maximální propustnosti dráhového systému pro každou měřenou hodinu ve všech scénářích byl použit vzorec:

$$k_{MAX(PWS)} = p \times \left(1 + \frac{t_{ICAO} + t_{PWS}}{60 - (t_{ICAO} + t_{PWS})} \right) + \frac{d_{PWS}}{r}$$

Kde $k_{MAX(RECAT-EU)}$ – maximální propustnost dráhového systému za měřenou hodinu (za podmínky RECAT-EU)

p – počet pohybů za měřenou hodinu (viz tabulka 12)

t_{ICAO} – časová rezerva za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách viz tabulka 11)

t_{PWS} – přínosy pro časovou rezervu za podmínky PWS (vyjádřená v sekundách viz. tabulku 15)

d_{PWS} – přínosy/ztráty pro vzdálenostní rezervu za podmínky PWS (vyjádřená v námořních mílích viz. tabulku 15)

r – standardní radarový rozstup (5 NM)

Podle výsledků z tabulky 16 je vidět, jak koncept PWS je o trochu zlepšil přínosy pro kapacitu dráhového systému ve srovnání s předchozím konceptem (RECAT-EU). A to kvůli zavedení dalších snížení minim rozstupů pro každou dvojici letadel.

Tabulka 16: Vypočítaná maximální propustnost pro PWS koncept,
(zdroj: vlastní zpracování)

	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejhorší scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro reálný scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejlepší scénář [pohybů/hod]
14.07.2019 (17:00-18:00)	53-54	54	61
15.07.2019 (11:00-12:00)	53	54-55	61
16.07.2019 (11:00-12:00)	50-52	53	61
17.07.2019 (12:00-13:00)	49-50	51-52	61

6.3.3 Přínosy z konceptu Large-Large 2NM

Tento koncept byl představen technologickým institutem Massachusetts. Současná minima radarových rozstupů v Evropě 2,5 NM (v Praze 3 NM) vyžadují, aby průměrná doba obsazení dráhy činila 50 sekund nebo méně. Naopak 2 NM rozstup vyžaduje výrazně nižší časy. Předtím než lze uplatnit tento koncept pro evropský systém je potřeba všechna letadla kategorie Large nahradit evropskými kategoriemi dle standardu ICAO. Původně program byl aplikován na letadla, které patří do kategorie Large dle FAA (viz tabulka 6 a tabulka 7, kapitola 4.3). Všechny letouny v průběhu měření, na které lze

aplikovat tato pravidla, jsou z kategorie Medium. Daný koncept udává přínosy výhradně pro přistání [13], [29].

Pro reálný scénář to vypadá následovně:

14.07.2019 se přidalo 8 NM, což je skoro o 3 letadla navíc (v případě Medium-Medium o 4 letadla navíc).

15.07.2019 se přidalo 6 NM, což je o 2 letadla navíc (v případě Medium-Medium o 3 letadla navíc).

16.07.2019 se přidalo 10 NM, což je o 3 letadla navíc (v případě Medium-Medium o 3 letadla navíc).

17.07.2019 nebyly žádné změny kvůli špičkové odletové hodině a nevhodnosti použití tohoto konceptu.

Přínosy, které byly dosaženy v „nejlepším“ scénáři, jsou následující:

14.07.2019 se přidalo 2 až 18 NM, což je o 0 až 6 letadel navíc (v případě Medium-Medium o 1 až 9 letadel navíc).

15.07.2019 se přidalo 3 až 17 NM, což je o 1 až 5 letadel navíc (v případě Medium-Medium o 1 až 8 letadel navíc).

16.07.2019 se přidalo 9 až 21 NM, což je o 1 až 7 letadel navíc (v případě Medium-Medium o 4 až 10 letadel navíc).

17.07.2019 se přidalo 0 až 8 NM, což je o 0 až 2 letadla navíc (v případě Medium-Medium o 0 až 4 letadla navíc).

Pro „nejhorší“ scénář jsou následující přínosy:

14.07.2019 se přidalo 0 až 18 NM, což je o 0 až 6 letadel navíc (v případě Medium-Medium o 0 až 9 letadel navíc).

15.07.2019 se přidalo 0 až 17 NM, což je o 0 až 5 letadel navíc (v případě Medium-Medium o 0 až 8 letadel navíc).

16.07.2019 se přidalo 5 až 20 NM, což je o 1 až 6 letadel navíc (v případě Medium-Medium o 2 až 10 letadel navíc).

17.07.2019 se přidalo 0 až 6NM, což je o 0 až 2 letadel navíc (v případě Medium-Medium o 0 až 3 letadel navíc).

Tabulka 17: Přínosy z LARGE-LARGE 2NM (zdroj: vlastní zpracování)

		LARGE-LARGE 2 NM		
		Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
14.07.2019		+ 0 s	+ 0 s	+ 0 s
17:00-18:00		<0; +18 NM>	+ 8 NM	<+ 2 NM; +18 NM>
		Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
15.07.2019		+ 0 s	+ 0 s	+ 0 s
11:00-12:00		<+ 0; 17 NM>	+ 6 NM	<+ 3 NM; +17 NM>
		Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
16.07.2019		+ 0 s	+ 0 s	+ 0 s
11:00-12:00		<+ 5 NM; +20 NM>	+ 10 NM	<+ 9 NM; +21 NM>
		Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
17.07.2019		+ 0 s	+ 0 s	+ 0 s
12:00-13:00		<+ 0; +6 NM>	+ 0NM	<+ 0; +8 NM>

Když sečíst přínosy z výsledků konceptu LARGE-LARGE 2 NM ukázané v tabulce 17 s „časovými rezervami“ z tabulky 11, pak dostaneme celkovou rezervu pro každý případ následovně:

$$R_c = t_{ICAO} + d_{LARGE-LARGE\ 2\ NM}$$

Kde R_c – celková rezerva dráhy

t_{ICAO} – časová rezerva za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách viz. tabulka 11)

$d_{LARGE-LARGE\ 2\ NM}$ – přínosy pro vzdálenostní rezervu za podmínky konceptu LARGE-LARGE 2 NM (vyjádřená v námořních mílích viz tabulka 17)

Žádné přínosy pro časovou rezervu z tohoto konceptu nebyly získány, a proto není potřeba jejich uvádět do vzorce.

Dále pro výpočet maximální propustností dráhového systému pro každou měřenou hodinu ve všech scénářích byl použit vzorec:

$$k_{MAX(LARGE-LARGE\ 2\ NM)} = p \times \left(1 + \frac{t_{ICAO}}{60 - t_{ICAO}} \right) + \frac{d_{LARGE-LARGE\ 2\ NM}}{r}$$

Kde $k_{MAX(LARGE-LARGE\ 2\ NM)}$ – maximální propustnost dráhového systému za měřenou hodinu (za pravidly konceptu LARGE-LARGE 2 NM)

p – počet pohybů za měřenou hodinu (viz. tabulka 12)

t_{ICAO} – časová rezerva za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách viz. tabulka 11)

d LARGE-LARGE 2 NM – přínosy pro vzdálenostní rezervu za podmínky LARGE-LARGE 2 NM (vyjádřená v námořních mílích viz. tabulka 17)

r – standardní radarový rozstup (5 NM)

Tabulka 18 udává výsledky možného maximálně možného navýšení propustnosti pomocí konceptu LARGE-LARGE 2 NM.

Tabulka 18: Vypočítaná maximální propustnost pro Large-Large 2 NM koncept,
(zdroj: vlastní zpracování)

	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejhorší scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro reálný scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejlepší scénář [pohybů/hod]
14.07.2019 (17:00-18:00)	52-57	55-57	61-67
15.07.2019 (11:00-12:00)	52-56	55-56	61-67
16.07.2019 (11:00-12:00)	51-57	54-57	62-68
17.07.2019 (12:00-13:00)	49-51	51	61-64

Přestože jsou výsledky z tohoto konceptů vynikající – není v tom úplné jistoty pro bezpečnost, kvůli kritické malým rozstupům dle turbulence v úplavu. Je zapotřebí simulací a testování tohoto konceptu před uplatněním do reálného provozu.

6.3.4 Přínosy z konceptu Dual-Glideslope

Dalším konceptem umožňujícím zkrácení minim rozstupů je Dual-Glideslope neboli „dvojitě přiblížení“ ve dvou různých sestupových rovinách, kde je první letadlo vedené standardním přiblížením a bod dotyku je přibližně 1000 ft od prahu dráhy. Druhé letadlo letí v horní sestupové rovině nestandardním přiblížením. Pro toto přiblížení existují určitá omezení: – letadlo by mělo být kategorií Large nebo Small podle FAA kategorizace pro Spojené státy (viz tabulka 6 a tabulka 7, kapitola 4.3). Kromě toho by se druhé letadlo mělo dotknout RWY až 4000 ft od prahu dráhy. Z toho plyne, že pro aplikace konceptu Dual-Glideslope na Letišti Václava Havla je potřeba mít RWY, která bude dlouhá minimálně 2500 m a GBAS systém umožňující „dvojitě přiblížení“ [13].

Podobný koncept HALS – High Approach Landing System fungoval na letišti ve Frankfurtu, akorát s paralelním dráhovým systémem [13].

Pražské letiště má délku RWY 06/24 cca 3715 m. Nicméně nemá letiště LKPR systém GBAS, který je rovněž nezbytný pro umožnění „Dvojitě sestupové roviny“.

Tento koncept byl prozkoumán v teoretické části (viz kapitola 2.9) z pohledu pravidel platných ve Spojených státech. Pro zpracování je tady nutnost jako s minulým konceptem (Large-Large 2NM) najít v tabulce s naměřenými daty (viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“) všechna letadla patřící do kategorií Large a Small a nahradit kategorií dle evropských standardů (ICAO).

Kvůli skladbě letadel na LKPR je tento koncept vhodně aplikovatelný pro všechny Medium a Light letouny, které jsou provozovány na Letišti Václava Havla. Rozpracovaná tabulka 19 nových minim rozstupů pro tento program na LKPR vypadá následovně:

Tabulka 19: Minima rozstupy podle konceptu Dual-Glideslope

(zdroj: vlastní zpracování dle [13])

Velicí/Následující	Medium	Light
A380-800	7 NM	8 NM
Heavy	3 NM	3 NM
Medium	1,5 NM	1,5 NM
Light	1,5 NM	1,5 NM

Podle výsledků tento koncept nese značné přínosy primárně pro přistání kvůli tomu, že je tento koncept aplikovatelný pouze ve fázích konečného přiblížení.

Jak je znázorněno v tabulce 20 nejvyšší přínosy jsou dosažené v „nejhorším“ scénáři.

14.07.2019 se přidalo 3,5 až 17 NM, což je o 1 až 5 letadel navíc.

15.07.2019 se přidalo 6 až 16,5 NM, což je o 1 až 5 letadel navíc.

16.07.2019 se přidalo 11,5 až 22,5 NM, což je o 1 až 7 letadel navíc.

17.07.2019 se přidalo 10,5 až 17,5 NM, což je o 1 až 5 letadel navíc.

Výsledky z reálného scénáře představují následující přínosy:

14.07.2019 se přidalo 10,5 NM, což je o 1 až 3 letadel navíc.

15.07.2019 se přidalo 8 NM, což je o 1 až 2 letadly navíc.

16.07.2019 se přidalo 15,5 NM, což je o 1 až 5 letadel navíc.

17.07.2019 při se přidalo 3,5NM, což je o letadlo navíc.

Pro „nejlepší“ scénář jsou následující přínosy:

14.07.2019 se přidalo 1,5 až 15 NM, což je o 0 až 5 letadel navíc.

15.07.2019 se přidalo 3 až 13,5 NM, což je o 0 až 4 letadel navíc.

16.07.2019 se přidalo 9 až 18 NM, což je o 1 až 6 letadel navíc.

17.07.2019 se přidalo 1,5 až 9 NM, což je o 0 až 3 letadla navíc.

Tabulka 20: Přínosy z konceptu Dual-Glideslope (zdroj: vlastní zpracování)

DUAL-GLIDESLOPE			
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
14.07.2019	+ 0 s	+ 0 s	+ 0 s
17:00-18:00	<+ 3,5 NM; + 17,5 NM>	+ 10,5 NM	<+ 1,5 NM; + 15 NM>
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
15.07.2019	+ 0 s	+ 0 s	+ 0 s
11:00-12:00	<+ 6 NM; +16,5 NM>	+ 8 NM	<+ 3 NM; +13,5 NM>
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
16.07.2019	+ 0 s	+ 0 s	+ 0 s
11:00-12:00	<+ 11,5 NM; +22,5 NM>	+ 15,5 NM	<+ 9 NM; +18 NM>
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
17.07.2019	+ 0 s	+ 0 s	+ 0 s
12:00-13:00	<+ 10,5 NM; +17,5 NM>	+ 3,5 NM	<+ 1,5 NM; +9 NM>

Když sečíst přínosy z výsledků tohoto konceptu ukázané v tabulce 20 s „časovými rezervami“ z tabulky 11, pak dostaneme celkovou rezervu pro každý případ následovně:

$$R_c = t_{ICAO} + d_{\text{Dual-Glideslope}}$$

Kde R_c – celková rezerva dráhy

t_{ICAO} – časová rezerva za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách viz. tabulka 11)

$d_{\text{Dual-Glideslope}}$ – přínosy pro vzdálenostní rezervu za podmínky Dual-Glideslope (vyjádřená v námořních mílích viz tabulka 20)

Žádné přínosy pro časovou rezervu z tohoto konceptu jako z předchozího (LARGE-LARGE 2 NM) nebyly získané, proto není potřeba jejich uvádět do vzorce. Dále pro výpočet maximální propustností dráhového systému pro každou měřenou hodinu ve všech scénářích byl použit vzorec:

$$k_{MAX(\text{Dual-Glideslope})} = p \times \left(1 + \frac{t_{ICAO}}{60 - t_{ICAO}} \right) + \frac{d_{\text{Dual-Glideslope}}}{r}$$

Kde $k_{MAX(RECAT-EU)}$ – maximální propustnost dráhového systému za měřenou hodinu (za podmínky Dual-Glideslope konceptu)

p – počet pohybů za měřenou hodinu (viz tabulka 12)

t_{ICAO} – časová rezerva za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách viz tabulka 11)

$d_{RECAT-EU}$ – přínosy pro vzdálenostní rezervu za podmínky Dual-Glideslope (vyjádřená v námořních mílích viz tabulku 20)

r – standardní radarový rozstup (5 NM)

Tabulka 21: Vypočítaná maximální propustnost pro Dual-Glideslope koncept,

(zdroj: vlastní zpracování)

	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejhorší scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro reálný scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejlepší scénář [pohybů/hod]
14.07.2019 (17:00-18:00)	52-58	55-58	61-67
15.07.2019 (11:00-12:00)	53-57	55-57	61-68
16.07.2019 (11:00-12:00)	51-59	55-59	62-68
17.07.2019 (12:00-13:00)	50-53	51-52	61-64

Proto tento koncept je považován za potenciálně přínosný ale nicméně náročný pro zavedení kvůli GBAS systému.

6.3.5 Přínosy z postavení paralelní RWY

Přínosy z vybudování další paralelní RWY se mohou lišit. Záleží, jakou vzdálenost budou mezi sebou mít. Pokud to bude soustava paralelně závislých drah, určité přínosy však budou mít za následek další řadu opatření a omezujících faktorů oproti soustavě nezávislých paralelních RWY. Omezujícím faktorem pro výstavbu další nezávislé RWY je nedostatek půdy.

Na Letišti Václava Havla se už poměrně dlouhou dobu plánuje postavit další RWY tak, aby tvořil dráhový systém nezávislých RWY (06L/24R a 06R/24L).

Soustava paralelních drah by pak fungovala v tzv. segregovaném provozu – kde jedna RWY je určena primárně pro odlety, a druhá by byla výhradně pro přiletý.

Tabulka 22: Přínosy paralelní RWY (zdroj: vlastní zpracování)

2 PARALLEL RWY			
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
14.07.2019	37 min	37-38 min	40-41 min
17:00-18:00	+ 22 min	<+ 22 min; + 23 min>	<+ 25 min; + 26 min>
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
15.07.2019	<+ 20 min; + 22 min>	<+ 20 min; + 23 min>	<+ 23 min; + 26 min>
11:00-12:00			
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
16.07.2019	<+ 17 min; + 27 min>	<+ 17 min; + 18 min>	<+ 22 min; + 31 min>
11:00-12:00			
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
17.07.2019	<+ 23 min; + 24 min>	<+ 23 min; + 24 min>	<+ 23 min; + 34 min>
12:00-13:00			

Když sečíst přínosy z výsledků ukázaných tabulce 22, dostaneme celkovou rezervu pro každý případ následovně:

$$R_c = t_{DRÁHY PRO VZLETY} + t_{DRÁHY PRO PŘÍSTÁNÍ}$$

Kde R_c – celková rezerva dráhy

$t_{DRÁHY PRO VZLETY}$ – časová rezerva RWY pro vzlety za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách, viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“)

$t_{DRÁHY PRO PŘÍSTÁNÍ}$ – časová rezerva RWY pro přistání za podmínky ICAO (vyjádřená v sekundách, viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“)

Dále pro výpočet maximální propustností dráhového systému pro každou měřenou hodinu ve všech scénářích byl použit vzorec:

$$k_{MAX(2RWY)} = p_{VZLETY} \times \left(1 + \frac{t_{DRÁHY PRO VZLETY}}{60 - t_{DRÁHY PRO VZLETY}} \right) + p_{PŘÍSTÁNÍ} \times \left(1 + \frac{t_{DRÁHY PRO PŘÍSTÁNÍ}}{60 - t_{DRÁHY PRO PŘÍSTÁNÍ}} \right)$$

Kde $k_{MAX(RECAT-EU)}$ – maximální propustnost dráhového systému za měřenou hodinu (za podmínky RECAT-EU)

p VZLETY – počet vzletů za měřenou hodinu (viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“)

p PŘÍSTÁNÍ – počet přistání za měřenou hodinu (viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“)

t DRÁHY PRO VZLETY – časová rezerva RWY pro vzlety za podmínky ICAO (vyjádřená v minutách, viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“)

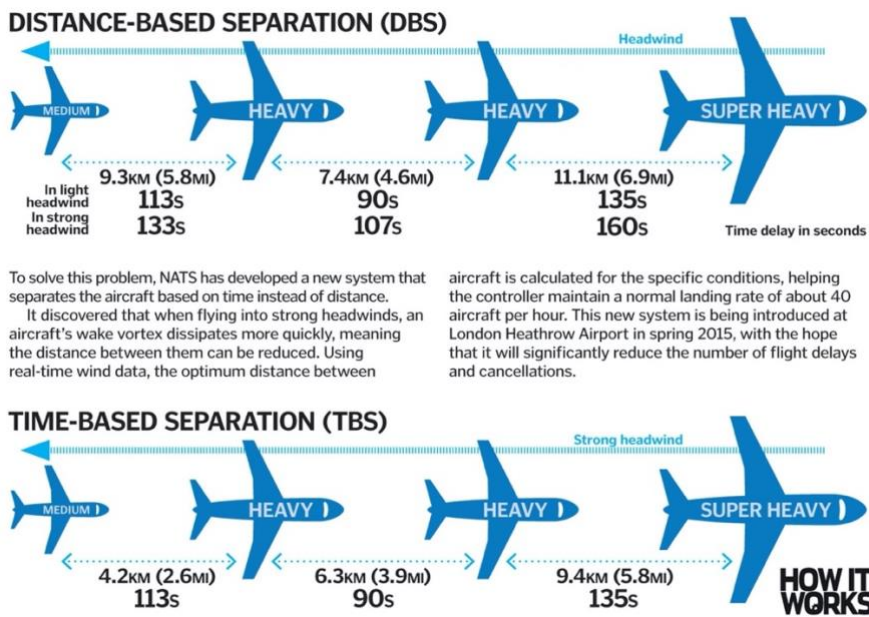
t DRÁHY PRO PŘÍSTÁNÍ – časová rezerva RWY pro přistání za podmínky ICAO (vyjádřená v sekundách, viz elektronická příloha v Excelu „měření a výpočty“)

Tabulka 23: Vypočítaná maximální propustnost pro 2 paralelní RWY,

(zdroj: vlastní zpracování)

	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejhorší scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max možná propustnost pro reálný scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max možná propustnost pro nejlepší scénář [pohybů/hod]
14.07.2019 (17:00-18:00)	106	109	126
15.07.2019 (11:00-12:00)	106	108	126
16.07.2019 (11:00-12:00)	102	105	126
17.07.2019 (12:00-13:00)	99	101	126

6.3.6 Přínosy z konceptu TBS



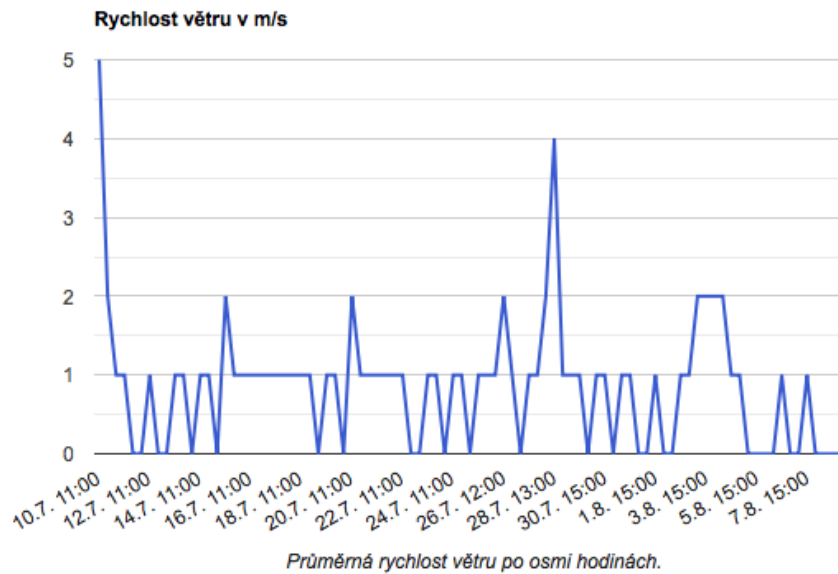
Obrázek 23: Porovnání DBS a TBS za přítomnosti protivětru [52]

TBS program je určen za účelem kompenzace ztrát vlivem protivětru. Teoreticky řečeno, za každých 5 kt rychlostí protivětru kapacita dráhového systému ztratí 1 pohyb za hodinu.

Aby bylo možné posoudit, zda je tento koncept pro Letiště Václava Havla přínosný nebo ne, je zapotřebí zjistit situaci s větrem v okolí letiště.

Na obrázku 24 je uvedeno měsíční měření ČHMÚ Českým hydrometeorologickým ústavem rychlosti větru v okolí letiště. Je potřeba mít 5 kt vítr, aby využití konceptu TBS dávalo smysl.

V různých výškách směr větru je proměnlivá hodnota. Za předpokladu toho, že by ukázané hodnoty rychlostí větru vystupovaly v roli protivětru, podle uvedených dat je vidět, že výskyty protivětru s rychlostí vyšší jak 5 kt byly jenom dvakrát za měsíc. To vypovídá, že pravděpodobně uplatnění konceptu TBS není tak aplikovatelné, a to především kvůli slabému větru na letišti. Kromě toho je potřeba ve speciálním vybavení pro ATC a zavedením dalších měřících senzorů.



Obrázek 24: Rychlost větru v okolí Letiště LKPR [51]

6.4 Shrnutí výsledků

Tabulka 24 a tabulka 25 představují výsledky měření a výpočtů (kapitola 6) pro všechny koncepty rozebrané a analyzované v kapitole 2 a v kapitole 4. Tabulka 24 je ve výpočtovém tvaru, kde jsou přínosy vyjádřené v námořních mílích (NM) a časových jednotkách (sekundy a minuty). V tabulce jsou výsledky měření ve čtyřech špičkových hodinách představených ve třech scénářích (nejhorší, reálný a nejlepší).

Nejvýhodnějším z hlediska navýšení kapacity dráhového systému, ale nicméně náročného na nasazení do provozu je program Dual-Glideslope.

Za nejméně přínosný koncept se považuje RECAT-EU kvůli ztrátám (zvýšené minima rozstupy pro Light letadly).

Tabulka 24: Shmutí výsledků ve výpočtovém tvaru (zdroj: vlastní zpracování)

		14.07.2019	17:00-18:00	15.07.2019	11:00-12:00	16.07.2019	11:00-12:00	17.07.2019	12:00-13:00
ICAO	Nejhorší scénář	13 min	- 2 min	15 min	- 2 min	11 min	- 3 min	10 min	- 2 min
	Reálný scénář	15 min	-	17 min	-	14 min	-	12 min	-
	Nejlepší scénář	20 min	+ 5 min	22 min	+ 5 min	20 min	+ 6 min	20 min	+ 8 min
RECAT-EU	Nejhorší scénář	<+ 20 s; + 80 s>	+ 1NM	+ 20 s	<0; + 5 NM>	+ 60 s	<+ 2NM; + 3 NM>	+ 0 s	+ 4 NM
	Reálný scénář	- 20 s	+0NM	- 20 s	+ 2 NM	+ 0s	+ 0NM	+ 1 NM	+ 0 s
	Nejlepší scénář	<- 20 s; - 40 s>	+0NM	- 40 s	<+ 0 NM; + 1,5 NM>	- 20 s; 0	+ 0 NM	+ 0 s	+ 0 NM
PWS STATIC	Nejhorší scénář	<+ 30 s; + 90 s>	<0; + 1 NM>	<+ 10 s; + 30 s>	<+ 4 NM; + 6 NM>	<+ 20 s; + 80 s>	<+ 2 NM; + 3,5 NM>	+ 0 s	<+ 3 NM; + 5,5 NM>
	Reálný scénář	+ 0 s	+0NM	+ 0 s	+ 2,5 NM	+ 0 s	+ 0 NM	+ 0 s	+ 1 NM
	Nejlepší scénář	+ 0 s	+0NM	+ 0 s	+ 1,5 NM	+ 0 s	+ 0 NM	+ 0 s	+ 0 NM
LARGE-LARGE 2 NM	Nejhorší scénář	+ 0 s	<0; + 18 NM>	+ 0 s	<+ 0; 17 NM>	+ 0 s	<+ 5 NM; + 20 NM>	+ 0 s	<+ 0; + 6 NM>
	Reálný scénář	+ 0 s	+ 8 NM	+ 0 s	+ 6 NM	+ 0 s	+ 10 NM	+ 0 s	+ 0 NM
	Nejlepší scénář	+ 0 s	<+ 2 NM; + 18 NM>	+ 0 s	<+ 3 NM; + 17 NM>	+ 0 s	<+ 9 NM; + 21 NM>	+ 0 s	<+ 0; + 8 NM>
DUAL-GLIDESLOPE	Nejhorší scénář	+ 0 s	<+ 3,5 NM; + 17,5 NM>	+ 0 s	<+ 6 NM; + 16,5 NM>	+ 0 s	<+ 11,5 NM; + 22,5 NM>	+ 0 s	<+ 10,5 NM; + 17,5 NM>
	Reálný scénář	+ 0 s	+ 10,5 NM	+ 0 s	+ 8 NM	+ 0 s	+ 15,5 NM	+ 0 s	+ 3,5 NM
	Nejlepší scénář	+ 0 s	<+ 1,5 NM; + 15 NM>	+ 0 s	<+ 3 NM; + 13,5 NM>	+ 0 s	<+ 9 NM; + 18 NM>	+ 0 s	<+ 1,5 NM; + 9 NM>
2 PARALLEL RWY	Nejhorší scénář	37 min	+ 22 min	37 min	<+ 20 min; + 22 min>	37 min	<+ 17 min; + 27 min>	37 min	<+ 23 min; + 24 min>
	Reálný scénář	37-38 min	<+ 22 min; + 23 min>	37-38 min	<+ 20 min; + 23 min>	37-38 min	<+ 17 min; + 18 min>	37-38 min	<+ 23 min; + 24 min>
	Nejlepší scénář	40-41 min	<+ 25 min; + 26 min>	40-41 min	<+ 23 min; + 26 min>	40-41 min	<+ 22 min; + 31 min>	40-41 min	<+ 23 min; + 34 min>

Tabulka 25: Shrnutí výsledků ve statistickém tvaru (zdroj: vlastní zpracování)

	14.07.2019			15.07.2019			16.07.2019			17.07.2019		
	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář	Nejhorší scénář	Reálný scénář	Nejlepší scénář
RECAT-EU koncept	1 - 2 1,9 - 3,8 %	0 0 %	-1 -1,6 %	0 - 1 0 - 1,9 %	0 0 %	-1 -1,6 %	0 - 1 0 - 2 %	0 0 %	0 0 %	1 2 %	0 - 1 0 - 2 %	0 0 %
PWS koncept	1 - 2 1,9 - 3,8 %	0 0 %	0 0 %	1 1,9 %	0 - 1 0 - 1,9 %	0 0 %	0 - 2 0 - 4 %	0 0 %	0 0 %	0 - 1 0 - 2 %	0 - 1 0 - 2 %	0 0 %
LARGE-LARGE 2 NIM koncept	0 - 5 0 - 9,6 %	1 - 3 1,9 - 5,6 %	0 - 6 0 - 9,8 %	0 - 4 0 - 7,7 %	1 - 2 1,9 - 3,7 %	0 - 6 0 - 9,8 %	1 - 7 2 - 14 %	1 - 4 1,9 - 7,5 %	1 - 7 1,6 - 11,5 %	0 - 2 0 - 4,1 %	0 0 %	0 - 3 0 - 4,9 %
DUAL-GLIDESLOPE koncept	0 - 6 0 - 11,5 %	1 - 4 1,9 - 7,4 %	0 - 6 0 - 9,8 %	1 - 5 1,9 - 9,6 %	1 - 3 1,9 - 5,6 %	0 - 7 0 - 11,5 %	1 - 9 2 - 18 %	2 - 6 3,8 - 11,3 %	1 - 7 1,6 - 11,5 %	1 - 4 2 - 8,2 %	0 - 1 0 - 2 %	0 - 3 0 - 4,9 %
	počet pohybů/hod											
	%											
	počet pohybů/hod											
	%											
	počet pohybů/hod											
	%											
	počet pohybů/hod											
	%											

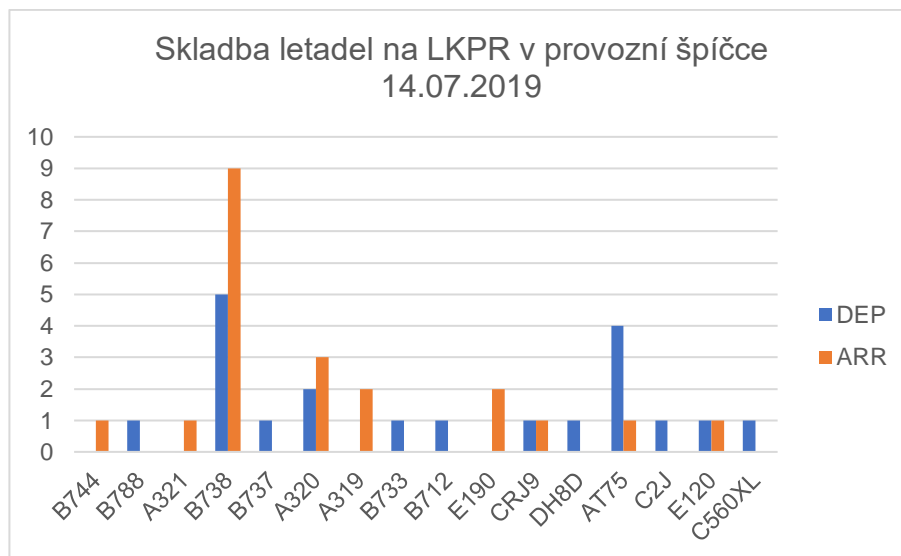
V tabulce 25 jsou ukázané výsledky ve formě přírůstků (počet navýšení/poklesů počtu pohybů za měřenou hodinu). Vypracováno ve všech třech možných scénářích a pro zvolené koncepty.

Nemělo smysl a objektivitu hodnotit přínosy z postavení paralelní dráhy, protože v tomto případě bude předebrán okolní provoz z vedlejší dráhy 12/30, která bude pozastavená kvůli zavedení paralelního dráhového systému. Nicméně ohledně nejmenšího rizika setkání s turbulencí v úplavu tento projekt v dnešní době předešel ostatní koncepty, které neprokázali dostačující úroveň bezpečnosti.

Přínosy z tabulky 25 mají výsledky vyjádřené jak ve formě přírůstků k maximální možné propustnosti, tak i ve formě procentuálního navýšení.

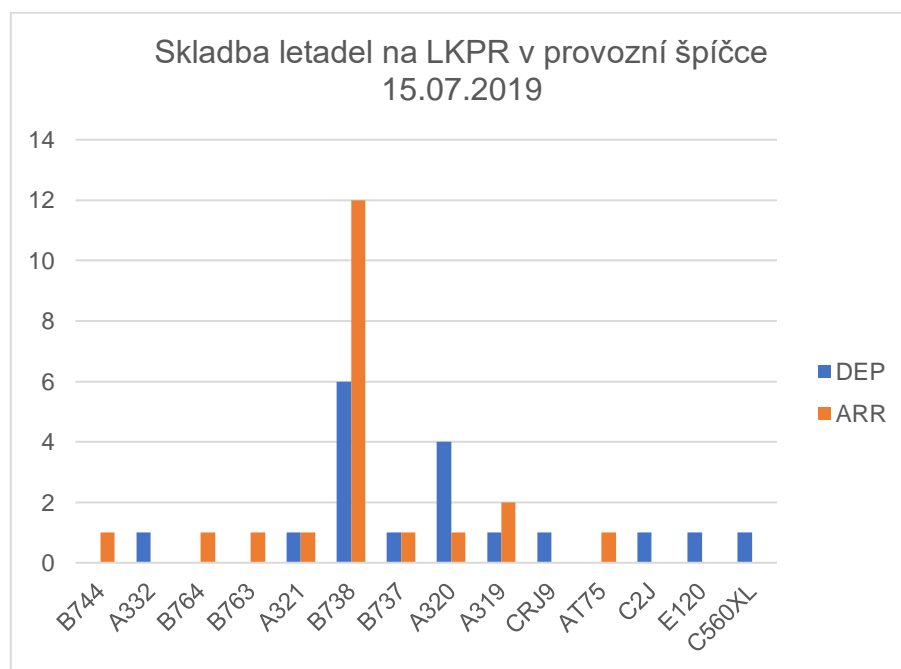
6.5 Vlastní návrh

Závěrečná část praktického výzkumu je věnována vytvoření vlastní matice minim rozstupů zavedených na základě maximální vzletové hmotnosti (MTOW) a rozpětí křídel každého letadla provazovaného na letišti LKPR. Výsledná matice v tabulce 26 je určena individuálně pro skladbu provozu na Letišti Václava Havla (uvedená v jednotkách NM).



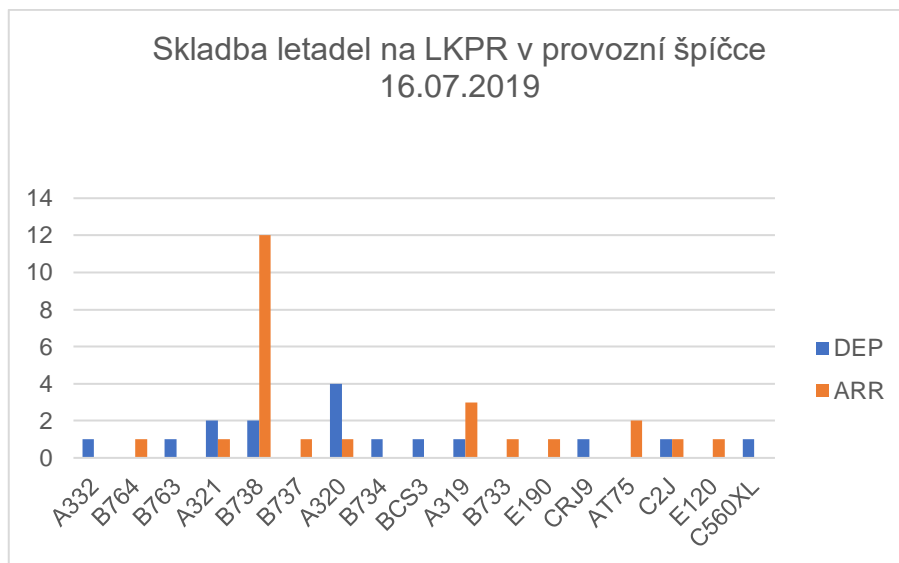
Obrázek 25: Skladba letadel na LKPR v provozní špičce 14.07.2019

(zdroj: vlastní zpracování)



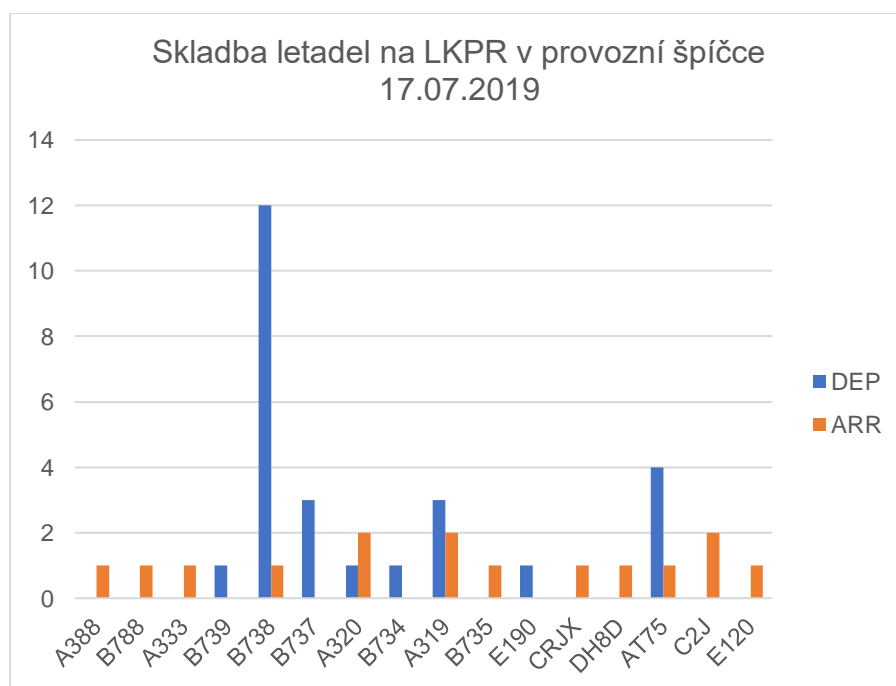
Obrázek 26: Skladba letadel na LKPR v provozní špičce 15.07.2019

(zdroj: vlastní zpracování)



Obrázek 27: Skladba letadel na LKPR v provozní špičce 16.07.2019

(zdroj: vlastní zpracování)



Obrázek 28: Skladba letadel na LKPR v provozní špičce 17.07.2019

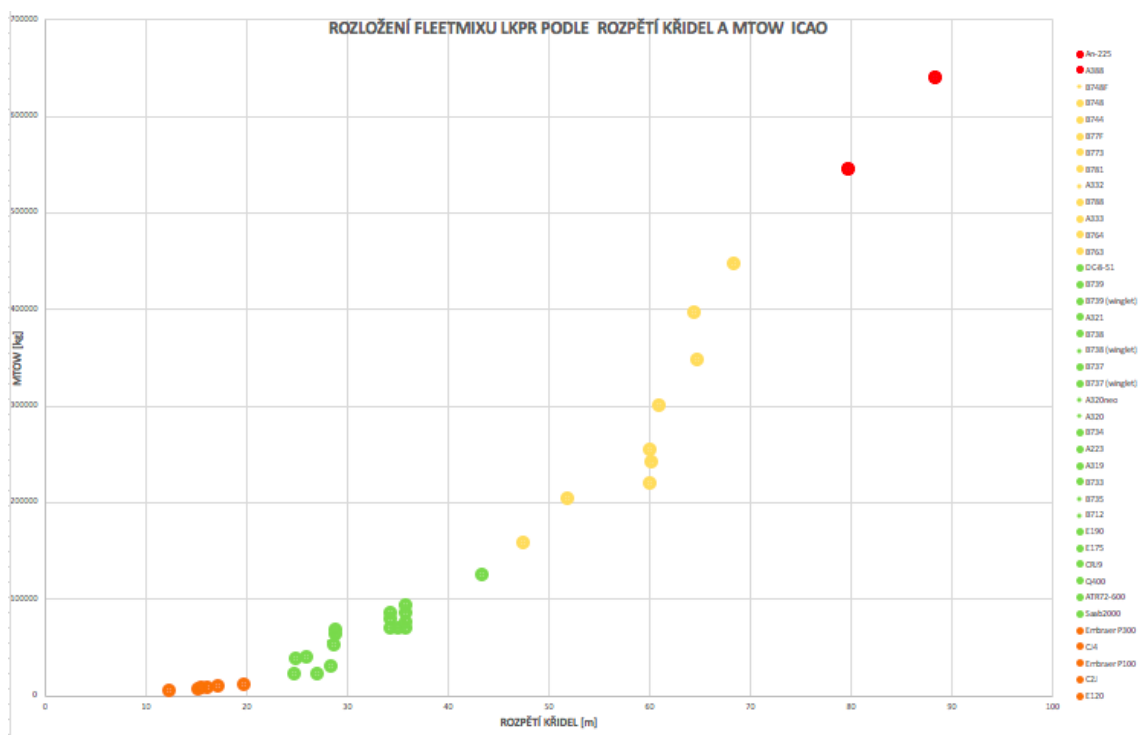
(zdroj: vlastní zpracování)

Podle uvedených grafů na obrázcích 25 až 28 je vidět, že největší počet letadel, provozovaných na LKPR, je Boeing B737-800. Následně se objevují Airbus A320/A319 a ATR.

Dalším krokem bylo vytvoření diagramu s podélnou osou vyjadřující rozpětí křídel. Hodnoty jsou udávány v metrech. Svislá osa diagramu ukazuje maximální vzletovou hmotnost letadla (MTOW) vyjádřenou v kilogramech.

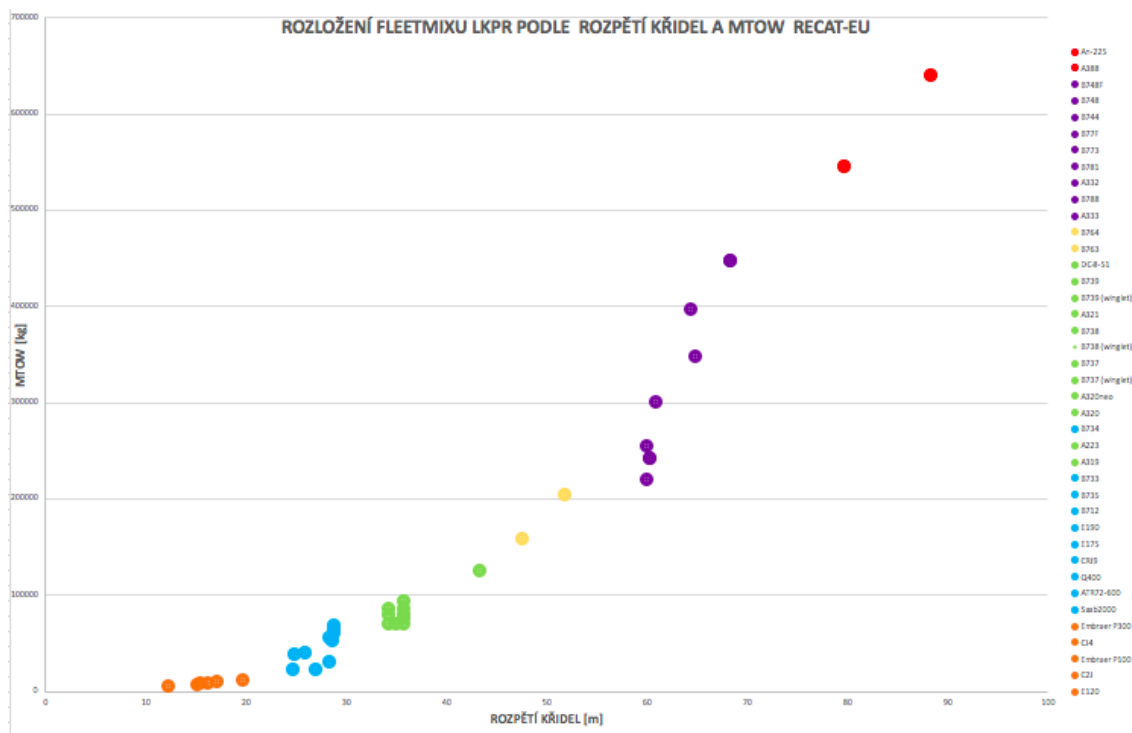
Myšlenkou pro vytvoření toho diagramu se staly reorganizace a princip jejich přepočítání. Pro přepočítání a zavedení nových dvou kategorií podle turbulence v úplavu RECAT-EU jsme použili podobný diagram pro výpočty.

Podle obrázku 29 je vidět, jak a proč byly rozděleny do dvou dalších skupin kategorie Medium (Upper Medium a Lower Medium) a kategorie Heavy (Upper Heavy a Lower Heavy). Na obrázku 29 jsou žluté body odpovídající kategorii Heavy a zelené body kategorii Medium, zatímco na obrázku 30 odpovídá fialová barva Upper Heavy letadlům, žlutá barva – Lower Heavy, zelená – Upper Medium, modrá – Lower Medium. Můžeme zde pozorovat významnou mez mezi těmito kategoriemi, což logicky posloužilo pro toto rozřídění letadel.



Obrázek 29: Třídění letadel podle MTOW a rozpětí křídel (ICAO)

(zdroj: vlastní zpracování)



Obrázek 30: Třídění letadel podle MTOW a rozpětí křidel (RECAT-EU)

(zdroj: vlastní zpracování)

Představený návrh „nové rekatégorizace“, bude obsahovat 10 kategorií. A1 a A2 odpovídají Super Heavy, zatím B1, B2, B3 a B4 je docela rozsáhlá původní kategorie Heavy. Dalšími kategoriemi jsou C1, C2 a C3 odpovídající původní kategorie Medium. Nakonec je navrhovaná kategorie D, která odpovídá dnešní kategorii pro Light letadla.

Princípem rozdělení do dalších kategorií posloužily „mezery“ (mezi jednotlivými letadly na obrázku 29 a na obrázku 30), které jsou vidět přímo v grafu. Podle návrhu se kategorie Upper Medium (zelené body na obrázku 30) dělí do dvou dalších kategorií (C1 a C2). Kategorie Lower Heavy (žlutá barva) se dělí do B3 a B4, Upper Heavy (fialové body) do B1 a B2. Následné kategorie Super Heavy jsme považovali za vhodné rozdělit do dvou dalších kategorií A1 a A2, kvůli velké mezeře mezi letouny An 225 a A380-800.

6.5.2 Předpokládané přínosy

Předpokládaným přínosem navržené matice individuálně určené pro Letiště Václava Havla je zkrácení minimum rozstupů mezi jednotlivými dvojicemi letadel, provozovanými na letišti, které nebyly rozpracované pro RECAT-EU, ale jsou o něco bezpečnější než PWS minima.

Za další prospěch oproti minulým rekatégorizacím jsou tzv. „zmenšené jednotky škálovatelnosti“ (0,25 NM) místo původního 1 NM pro ICAO a RECAT-EU nebo 0,5 NM

pro PWS, což v jednom případě také způsobuje nějakou dodatečnou rezervu pro bezpečnost, a v druhém případě prospěch kvůli dodatečnému zkrácení rozstupů.

Podle výše uvedeného postupu byly provedené výpočty a vyhodnocení přínosů z matice minim rozstupů.

Výsledky, které jsou ukázané v tabulce 27 následující:

V každém scénáři jsou přínosy z nové matice minim rozstupů oproti pravidlům ICAO, které byly platné do listopadu (viz kapitolu 4 „změny v dokumentu ICAO DOC 4444 PANS od listopadu 2020“)

Tabulka 27: Přínosy z navržené matice minim rozstupů pro LKPR, (zdroj: vlastní zpracování)

	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejhorší scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro reálný scénář [pohybů/hod]	Vypočítaná max. možná propustnost pro nejlepší scénář [pohybů/hod]
14.07.2019 (17:00-18:00)	53-54	55-56	63-67
15.07.2019 (11:00-12:00)	53-54	55-57	63-66
16.07.2019 (11:00-12:00)	52-54	54-56	64-69
17.07.2019 (12:00-13:00)	52-54	52-53	64-69

Tabulka 28 ukazuje výsledky přínosů z navržené matice pro Letiště Václava Havla. Sloupec „počet pohybů“ ukazuje maximální možný přírůstek počtu pohybů za hodinu a sloupec „%“ udává procentuální navýšení.

Tabulka 28: Výsledky z matice minim rozstupů pro LKPR (zdroj: vlastní zpracování)

		počet pohybů/hod	%
14.07.2019	Nejhorší scénář	2 - 6	3,8 - 11,5 %
	Reální scénář	1 - 2	1,9 - 3,7 %
	Nejlepší scénář	1 - 2	1,6 - 3,3 %
15.07.2019	Nejhorší scénář	2 - 4	3,8 - 7,7 %
	Reální scénář	1 - 3	1,9 - 5,6 %
	Nejlepší scénář	1 - 2	1,6 - 3,3 %
16.07.2019	Nejhorší scénář	3 - 8	6 - 16 %
	Reální scénář	1 - 3	1,9 - 5,7 %
	Nejlepší scénář	2 - 4	3,3 - 6,6 %
17.07.2019	Nejhorší scénář	3 - 8	6,1 - 16,3 %
	Reální scénář	1 - 2	2,9 - 3,9 %
	Nejlepší scénář	1 - 3	1,6 - 4,9 %

Podle výsledků je vidět, že větší přínosy navržená matice přináší pro nejhorší scénář, zatímco pro ostatní scénáře má taky pozitivní vlivy.

7 Diskuze

Pro větší riziko setkání s turbulencí v úplavu byla zvolena špičková sezona s největším počtem pohybů za hodinu. Pomocí aplikace Flight Radar bylo provedeno týdenní měření a vedení každého pohybu do záznamu včetně jeho magnetického směru (pro identifikace dráhy, která byla letadlem využita pro vzlet/přistání), typu, času zahájení vzletu nebo přistání.

Před COVID-19 byla tendence k narůstání počtu letů pro Pražské letiště. Měřící období bylo od 14.07.2019 až 20.07.2019. Pro detailnější výpočet a provedení simulaci existuje celá řada simulačních nástrojů k dispozici. Jedny z nejvýznamnějších jsou Monte-Carlo model, MATLAB, FAA Airfield Capacity Model. Pro výpočet dosažených výsledků byl použit MC Excel. Každý koncept před jeho aplikováním na již aktuálně stanovená předpisy byl detailně prozkoumán. I když použití simulačních nástrojů usnadňuje výpočtový proces, ruční počítání na základě stanovených podmínek pro každý koncept umožňuje hlubší pochopení vybraných konceptů a lepší ponoření se do téma. Po analýze každého z konceptů se uvádí výsledek ve formátu tabulky, kde je vidět, jak může konkrétní koncept ovlivnit propustnost dráhy kvůli zavedení nových standardů pro minima rozstupy. Následně jsou předpoklady pro zavedení konceptů, a jaké na to jsou podmínky a omezení, pokud existují.

Jedním z hlavních omezení je dosud nezavedený minimální radarový rozstup 2,5 NM pro Českou republiku, což je opravdu důležité pro aplikování některých konceptů (např. Large-Large 2 NM nebo Dual-Glideslope). Kromě toho je potřeba pro výstavbu dalších pojezdových drah pro rychloodbočení, které by tím umožnily zkrácení času obsazení dráhy (ROT – Runway Occupancy Time) a rychlejší vyklizení RWY pro další letadlo. Navíc je nutné obnovení softwaru a příslušný zácvik na nové postupy pro řídicí letového provozu, a hlavně začlenění nových pravidel na právní úrovni z hlediska předpisů a dalších dokumentů, založených na minimu rozstupů jak radarových, tak i podle turbulencí v úplavu.

Každý koncept měl teda vstupy a výstupy. Za vstupy považujeme vstupní hodnoty, neboli jaké jsou nové minima rozstupy nabízená konceptem a za jaké splnění podmínek. Za výstup konceptu pokládáme výsledné změny kvůli aplikování nových standardů a dosažené přínosy jednotlivého konceptu.

Přestože RECAT-EU prokázal mály úspěch (většina přínosů jsou pro nejhorší scénář) ve srovnání s ostatními koncepty z hlediska navýšení kapacity a propustnosti, nelze tento koncept považovat za nepřínosný. Příčinou malých přínosů je homogenní skladba

letadel na Letiště Václava Havla (Medium letadla 79 až 95% z celkového počtu). I když proběhlo dělení kategorií Medium na další dvě kategorií (Upper Medium a Lower Medium), nemělo to velký vliv pro skladbu letadel LKPR a to kvůli většímu počtu Upper Medium letadel. Nicméně, RECAT-EU hraje kompenzační role, tak při „nejhorších“ scénářích dokáže částečně vykompenzovat ztráty kvůli nejhorším kombinacím seřazení letadel. Tímto způsobem RECAT-EU nepřináší velké benefity, ale vyrovnává všechny scénáře na jeden úroveň efektivity (tj. čím líp bude seřazení letadel, tím méně bude přínosu z využití konceptu RECAT-EU a naopak).

Jako koncept RECAT-EU, PWS koncept přináší benefity většinou jen pro nejhorší scénáře. Může kompenzovat ztrátu času kvůli nejhorší kombinaci uspořádání letadel využitím nových minim rozstupů. Většinou PWS dává přínosy pro přistání a žádné ztráty oproti RECAT-EU. A to kvůli zavedení dalších snížení minim rozstupů pro každou dvojici letadel. Tímto koncept PWS má o trochu více přínosů než RECAT-EU.

Další koncept byl představen Technologickým Institutem Massachusetts. Jedná se o konceptu zkrácených minim rozstupů pro Large-Large letadly do 2 NM. Současná minima radarových rozstupů v Evropě 2,5 NM (v České Republice 3 NM) vyžadují, aby průměrná doba obsazení dráhy činila 50 sekund nebo méně. Naopak 2 NM rozstup vyžaduje výrazně nižší časy. Daný koncept udává přínosy výhradně pro přistání, jak již bylo zmíněno v teoretické části (kapitola 2). Přestože je tento koncept považován za docela přínosný, je v rozporu s aktuálně stanovenými předpisy. Tento program nebyl dosud nikdy uplatňován (jen v testovacím režimu ve Spojených státech provedením různých simulace na letištích).

V České republice tento koncept nebude pravděpodobně realizován kvůli provozním omezením a bezpečnostním aspektům. ČR je malý stát, kde je ovlivňujícím faktorem omezený čas pro řídicí stihnout předat letadla mezi různými stanovišti ATC (ACC-APP-TWR) se stanovenými rozstupy. Kvůli tomu se může zvětšit pracovní zátěž řídicích. Pro realizaci tohoto konceptu je nutně mít přehledový radar s vysokou přesností (Minima 3 NM a menší se nedají dnes v ČR povolit). Následné zavedení speciálního podporovacího systému pro řídicích letového provozu. Z hlediska infrastruktury bude pro rychlé vyklízení RWY potřeba vybudování dostačujícího počtu pojezdových drah pro rychlé odbočení (dnes je v Praze jenom jedná ale i ta nedokáže mít úplné charakteristiky odpovídající „rychloodbočkám“).

Ačkoliv jsou výsledky z tohoto konceptů vynikající – není v tom úplné jistoty pro bezpečnost kvůli kriticky malým rozstupům dle turbulence v úplavu. Je zapotřebí

hlubšího prozkoumání konceptu Large-Large 2 NM provedením simulací a testování před uplatněním do reálného provozu.

Nejvíce vhodný koncept pro LKPR přinášející potenciální přínosy je Dual-Glideslope koncept, a to pro všechny scénáře. Je to kvůli tomu, že v provozu na Letišti Václava Havla jsou většinou letadla kategorie Medium. I když předchází koncept (Large-Large 2 NM) měl teoretické předpoklady pro uplatnění a velké přínosy, koncept Dual-Glideslope má oproti tomu větší možnosti ve zkracování minim rozstupů kvůli dalším možným kombinacím párování, než jen sestavení Medium-Medium dvojíc. Přestože Letiště Václava Havla má k dispozici dostačující délku dráhy hlavním problémem nastává nedostatek systému GBAS, který umožňuje dvojitě přistání na letišti zavedením dodatečné (nestandardní) sestupové roviny. Proto tento koncept je považován za potenciálně přínosný pro Letiště Václava Havla ale náročný pro zavedení. Tento program je tedy vhodný na zamýšlení pro budoucnost.

Na Letišti Václava Havla se už poměrně dlouhou dobu plánuje postavit další RWY tak, aby tvořil dráhový systém paralelně nezávislých drah. Soustava paralelních drah by pak fungovala v tzv. segregovaném provozu – kde jedna RWY je určena primárně pro odlety, a druhá by byla výhradně pro přílety. Kvůli tomu by byl provoz RWY 12/30 pozastaven. Nemělo smysl a objektivitu hodnotit přínosy z postavení paralelní dráhy, protože v tomto případě bude předeprán okolní provoz z vedlejší dráhy 12/30, která bude pozastavená kvůli zavedení paralelního dráhového systému nezávislých RWY (06L/24R a 06R/24L). Nicméně pokud by byla možnost přidat paralelní RWY, při současné hustotě provozu, nebyly by problémy se zajištěním rozstupů z důvodu turbulence v úplavu. Přidáním další RWY by se pohyby nenavázaly těsně na sebe, což se projevuje v dostatečné časové a vzdálenostní rezervě každé dráhy. Kromě toho z hlediska nejmenšího rizika setkání s turbulencí v úplavu tento projekt v dnešní době předešel ostatní koncepty, které neprokázali dostačující úroveň bezpečnosti.

Posledním z nejvýznamnějších konceptů je TBS koncept, založený na kompenzaci ztrát, získaných kvůli protivětru na úseku konečného přiblížení.

Koncept TBS se týká kompenzace protivětru, kde přistávající letadla letí déle úsekem konečného přiblížení, za přítomnosti protivětru. Kvůli slabému větru na letišti toto vypovídá, že pravděpodobně uplatnění konceptu TBS nepřinese žádné přínosy.

Kromě toho je TBS koncept velmi náročný s hlediska zavedení do provozu (je potřeba ve speciálním vybavení pro ATC a zavedením dalších měřících senzorů pro fungování systému). Dle potvrzení pracovníků ŘLP se v okolí LKPR nevyskytuje silný vítr. Většinou je tento koncept vhodný pro letiště v horských místnostech nebo na pobřežích vedle

moře a oceánů, kde je pravděpodobný výskyt větrů mnohem vyšší než v Praze. Proto koncept TBS není pro Letiště Václava Havla přínosný.

Podobná analýza různých konceptů a jejich přínosů byla provedena v simulačním modelu Monte-Carlo na bázi Technologického Institutu Massachusetts. Výsledky dosažené Institutem jsou v souladu s výsledky uvedenými v této práci. Hodnoty přínosu získané technologickým institutem leží v intervalu hodnot obdržených v bakalářské práci (viz tabulka 29). Výsledky ukazují přírůstky pohybů vyjádřené procentuálně.

Tabulka 29: Porovnání výsledků práce s výsledky získané Technologickým Institutem Massachusetts – MIT (zdroj: vlastní zpracování)

	RECAT-EU	PWS	LARGE- LARGE 2 NM	DUAL- GLIDESLOPE
Výsledky získané MIT	0,8 %	1,3 %	9,9 %	14 %
Výsledky BP	0 – 3,8 %	0 – 4 %	0 – 11,5 %	0 – 18 %

Podle budoucích projektů – každé velké letiště by mělo mít vlastní matici minim rozstupů založenou na individuální skladbě letadel.

Konečným výstupem bakalářské práce bylo vytvoření vlastní matice minim rozstupů určené primárně pro Letiště Václava Havla v Praze. Pro návrh nových minim rozstupů posloužily znalosti získané z teorií a přehled do možných zavedení nových minim rozstupů z různých konceptů. Navrhovaná matice obsahuje 41 typ letadel vyskytujících na letišti LKPR. Všechny rozstupy mezi letadly jsou v námořních mílech. Podle výsledků lze považovat tento návrh za vhodný ale je potřeba na další prozkoumání z praktického hlediska (provedení různých simulací pro ověření na bezpečnost konceptu). Nicméně hlavním omezujícím faktorem pro zavedení do provozu této matice minim rozstupů slouží minimální radarový rozstup v ČR (3 NM). Matice obsahuje nové standardy pro minima radarových rozstupů (2,5 NM). V budoucnu by měl být zaveden minimální radarový rozstup 2,5 NM, již existuje na Evropských letištích (Německo, Velká Británie atd.). Do ty doby by mohla být rozpracována a zdokonalena matice rozstupů určená primárně pro navýšení kapacity letiště a snížení rizika nebezpečí turbulence v úplavu na Pražském letišti.

8 Závěr

Dnes neustále roste poptávka po letecké dopravě, což způsobuje zahuštění vzdušného prostoru, nárůst počtu pohybů na letištích, a tím dochází i k dalším komplikacím z pohledu řízení letového provozu.

Turbulence v úplavu je velmi nebezpečný jev, který může mít za následek nebezpečí pro lidské životy, jak tomu napovídá mnoho tragických nehod uvedených v teoretické části.

S narůstajícím počtem letů se zvedá počet pohybů ve špičkových hodinách. Tím se výrazně zmenšují potenciální časové a vzdálenostní rezervy, kde skoro každou minutu letadlo buď přistává, nebo odlétá z jedné RWY. Proto roste potřeba dalších úprav pro minima rozstupů podle turbulence v úplavu.

Existuje celá řada postupů a technických řešení, která byla zkoumána v teoretické části této bakalářské práce. V současné době mnoho letišť přijímá nové koncepty spojené s nalezením nových zkrácených minim rozstupů, jako jsou rekatégorizace – RECAT-EU a PWS koncept pro úplnou matici zkrácených minim pro všechny dvojice letadel. Hlavním principem je však udržování bezpečnosti. I když je koncept z teoretického hlediska přínosný pro navýšení kapacity dráhového systému anebo pro kompenzaci zdržení letů na letišti, nesmí být v rozporu s bezpečnostními podmínkami.

Některé koncepty jsou stále ve vývoji nebo v testovacím režimu, jako již zmíněný dynamický PWS vycházející z 3. fáze rekatégorizace.

Na Letišti Václava Havla dochází k překročení počtu pohybů většinou v letních špičkových hodinách. Proto se riziko vzniku fenoménu „wake turbulence“ zvedá. Skladba letadel na letišti vypadá jasně homogenně s největším výskytem Medium letadel. Je tedy zapotřebí dalších mnoha úprav, především s ohledem pro budoucnost.

V praktické části byla provedena analýza různých metod a konceptů dosud na Letišti Václava Havla nepoužívaných, a to včetně vypočítání přínosů s postavením nové paralelní RWY, která bude začleněna do budoucích projektů.

Výsledky pak ukázaly, jaké změny by každý koncept poskytl, kdyby byl uplatňován na letišti LKPR. Kromě posouzení přínosů a ztrát byly také zmíněny omezení a limitující faktory, některá doporučení a podmínky pro nasazení každého z konceptů. Hodně použitelných informací pro tuto bakalářskou práci se čerpalo prostřednictvím komunikace s odborníky (pracovníky stanoviště APP a TWR).

Finálním krokem praktické části bylo vlastní zpracování a návrh matice zaměřené primárně na Letiště Václava Havla a na jeho skladbu provozu, včetně popisu hlavních principů rozdělení letadel do různých kategorií.

V této bakalářské práci bylo provedeno prozkoumání navržených konceptů, postupů a technických řešení ohledně minima rozstupů podle turbulence v úplavu a různé aspekty vedoucí k jejich zkracování.

Výstupem práce je posouzení různých metod, které dosud nejsou na Letišti Václava Havla uplatňovány, a rovněž vlastní návrh pro řešení nové reorganizace a souvisejících nových minim rozstupů.

I když existuje mnoho omezení z hlediska zavedení a implementace nových pravidel pro snižování minim rozstupů, je toto téma stále aktuální a v rozvoji. Tak například proběhly změny týkající se zavedením nové kategorizace od listopadu 2020 zmíněné v ICAO Dokument 4444-PANS. To znamená, že je stále potřeba úprav určených k navýšení kapacity letišť a snížení rizika nebezpečí kvůli turbulence v úplavu. Proto by do budoucna bylo žádoucí další prozkoumání konceptů a navržené matice, ale také provedení simulace s každým modelem zvlášť, a v kombinaci vytvořit zdokonalený model vhodný pro aplikování na Letišti Václava Havla umožňující optimalizace a bezpečnost na vysoké úrovni.

9 Seznam použitých zdrojů

- [1]. JSC Ural Airlines. [online]. 2013 [cit. 10.08.2019]. Dostupné z: <https://www.uralairlines.ru/cs/airports/fra/>
- [2]. Wakenet. An airport view on wake vortex separation a FRA and its affect on capacity. [online]. [cit. 21.08.2019]. Dostupné z: http://www.wakenet.eu/fileadmin/user_upload/SpecificWorkshop_ConceptsCapacity/WN3E_Capacity_Workshop_Fraport_Wendeberg.pdf
- [3]. Planeta Cestovani.cz. Největší letiště světa. [online]. [cit. 24.08.2019]. Dostupné z: <https://www.planetacestovani.cz/nejvetsi-letiste-sveta/>
- [4]. UK Civil Aviation Authority. [online]. [cit. 11.09.2019]. Dostupné z: <https://www.caa.co.uk/Data-and-analysis/UK-aviation-market/Airports/Datasets/>
- [5]. Charles de Gaulle Airport. SKYbrary Aviation Safety. [online]. [cit. 25.11.2019]. Dostupné z: <https://www.skybrary.aero/index.php/LFPG>
- [6]. Runway Alternation. Airport Expansion Consultation. [online]. [cit. 21.11.2019]. Dostupné z: <https://aec.heathrowconsultation.com/topics/runway-alternation/>
- [7]. Heathrow Airport. [online]. [cit. 07.01.2020]. Dostupné z: https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/local-community/noise/reports-and-statistics/reports/operational-data/Runway_Alternation_Programme_2020.pdf
- [8]. Time based separation at Heathrow a world first - NATS. [online]. [cit. 24.01.2020]. Dostupné z: <https://www.nats.aero/news/time-based-separation-heathrow-world-first/>
- [9]. ICAO. RE-CATEGORISATION. [online]. [cit. 24.01.2020]. Dostupné z: https://www.icao.int/Meetings/anconf13/Documents/WP/wp_048_en.pdf
- [10]. Paris Aéroport. Site officiel des aéroports Paris-CDG et Paris-Orly. [online]. [cit. 27.11.2019]. Dostupné z: https://www.parisaeroport.fr/docs/default-source/groupe-fichiers/finance/reasons-investisseurs/trafic/2018/15-january-2019-groupe-adp-december-2018-traffic-figures.pdf?sfvrsn=c9f8f4bd_2
- [11]. KERNER, L., V. SÝKORA a L. KULČÁK. Provozní aspekty letišť. Vydavatelství ČVUT. Praha, 2003, 270 s. ISBN 80-010-2841-0. [cit. 15.03.2020]

- [12]. DE NEUFVILLE, R. a A. R. ODONI. Airport systems – planning, design and management. McGraw – Hill Education. New York, 2003, 883 p. ISBN 0-07-138477-4. [cit. 18.03.2020]
- [13]. A System Level Study of New Wake Turbulence Separation Concepts and Their Impact on Airport Capacity. [online]. [cit. 20.05.2019]. Dostupné z: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/108355>
- [14]. Federal Aviation Administration. “Satellite Navigation - NAS Implementation”. 2014 [online]. [cit. 16.06.2019]. Dostupné z: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navs%20ervices/gnss/nas/procedures/rnav_rnp/
- [15]. Wakenet - Publications . WakeNet. [online]. [cit. 15.07. 2020]. Dostupné z: <http://www.wakenet.eu/index.php?id=61>
- [16]. The MITRE Corporation. Status of Airport Capacities for GBAS-Enabled Dual-Glideslope Approaches. [online]. [cit. 29.07.2019]. Dostupné z: <https://www.mitre.org/publications>
- [17]. NATS. AIS. [online]. [cit. 29.07.2019]. Dostupné z: http://www.nats-uk.ead-it.com/public/index.php%3Foption=com_content&task=blogcategory&id=161&Itemid=58.html
- [18]. NATS. A global leader in air traffic management and airport performance. [online]. [cit. 09.04.2020]. Dostupné z: <https://www.nats.aero/wp-content/uploads/2014/12/TBS-Updates-to-EGLL-AIP.pdf>
- [19]. EUROCONTROL. Supporting European Aviation. Time Based Separation. [online]. [cit.21.09.2019] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/search?keywords=time%20based%20separation>
- [20]. Wakenet. Wake Vortex Projects. [online]. [cit. 28.09.2019] Dostupné z: <http://www.wakenet.eu/index.php?id=12>
- [21]. Wake Vortex Turbulence. Skybrary Aviation Safety. [online]. [cit. 05.07.2019]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Wake_Vortex_Turbulence
- [22]. Bc. MATOUŠEK, R.: Metoda výpočtu teoretické kapacity vzletové a přistávací dráhy. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2019. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Michal Dorda, Ph.D. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/136809/MAT0287_FS_N2301_2301T003_40_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [23]. Crash of a PZL. Mielec AN-2 in Kherson. Aircraft Accidents Archives. [online]. [cit. 02.07.2020]. Dostupné z: <https://www.baaa-acro.com/crash/crash-pzl-mielec-2-kherson-14-killed>
- [24]. ASN Aircraft accident Airbus A300B4-605R N14053 Belle Harbor, NY. Aviation Safety Network. [online]. [cit. 15.07.2020]. Dostupné z: <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=20011112-0>
- [25]. ASN Aircraft accident Yakovlev Yak-40 UK-87985 Tashkent Airport (TAS). Aviation Safety Network. [online]. [cit. 16.07.2020]. Dostupné z: <https://aviation-safety.net/database/record.php?id=20040113-0>
- [26]. Sydney Australia, 2008. SKYbrary Aviation Safety. [online]. [cit. 02.08.2020]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/SF34_vicinity_Sydney_Australia_2008
- [27]. Accident Robin DR.400-180R Remorqueur D-EEOP, 09 Sep 2012. Aviation Safety Network. [online]. [cit. 27.11.2020]. Dostupné z: <https://aviation-safety.net/wikibase/149039>
- [28]. DVOŘÁK, J., CHLEBEK, J., 2006. Letecký zákon a postupy ATC (010 00). 1. vyd. Brno: CERM. 484 s. ISBN 80-7204-439-7. [cit. 20.07.2020]
- [29]. Air Navigation Services of the CR. [online]. [cit. 26.07.2020]. Dostupné z: <http://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/index.htm>
- [30]. Air Traffic Control. Document Information. Federal Aviation Administration [online]. [cit. 02.08.2020]. Dostupné z: https://www.faa.gov/regulations_policies/orders_notices/index.cfm/go/document.information/documentID/1036234
- [31]. EUROCONTROL. Supporting European Aviation. Pair wise separations pws recat 2. [online]. [cit. 26.11.2019]. Dostupné z: https://www.eurocontrol.int/search?keywords=pair%20wise%20separations%20pws%20recat%202&sort_by=search_api_relevance
- [32]. Runway systems. Letiště Václava Havla Praha, Ruzyně. [online]. [cit. 16.08.2020]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/runway-systems>
- [33]. Změny v provozu. Letiště Václava Havla Praha, Ruzyně. [online]. [cit. 20.08.2020]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/zmeny-v-provozu>

- [34]. Ruzyňská dráha 13/31. [online]. [cit. 26.08.2020]. Dostupné z: <http://www.planes.cz/cs/article/6970>
- [35]. Air Navigation Services of the CR. LKPR-Praha, Ruzyně. [online]. [cit. 02.09.2020]. Dostupné z: https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/a2-pr-txt1.pdf
- [36]. Letecký provoz. Letiště Praha - Letiště Václava Havla [online]. [cit. 10.09.2020]. Dostupné z: <https://praha-letiste.eu/letecky-provoz/>
- [37]. Reduced Departure Intervals and High Intensity Runway Operations. [online]. [cit. 10.09.2020]. Dostupné z: <https://www.iaa.ie/air-traffic-management/innovation/reduced-departure-intervals-and-high-intensity-runway-operations>
- [38]. Paralelní dráha. Letiště Václava Havla Praha, Ruzyně. [online]. [cit. 26.08.2019]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/paralelni-draha-detail>
- [39]. Historie dráhového systému. Letiště Václava Havla Praha, Ruzyně. [online]. [cit. 15.10.2020]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/en/node/5235>
- [40]. Technické parametry dráhy. Letiště Václava Havla Praha, Ruzyně. [online]. [cit. 21.10.2020]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/technicke-parametry-drahy>
- [41]. Novinky.cz. [online]. [cit. 23.10.2020]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/ekonomika/clanek/ruzyne-je-vycerpana-potrebuje-novou-ranvej-i-vez-tvrdi-sef-rizeni-letoveho-provozu-40064270>
- [42]. ScienceDirect. Scheduling aircraft take-offs and landings on interdependent and heterogeneous runways. [online]. [cit. 27.10.2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554515301162>
- [43]. London Heathrow Statistics. Wikimedia Commons. [online]. [cit. 02.11.2020] Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:London_Heathrow_Statistics.png
- [44]. BBC NEWS. London. One year deadline for Terminal 5. 301. [online]. [cit. 02.11.2020] Dostupné z: http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/england/london/6496285.stm
- [45]. AirportWatch. Heathrow runways. [online]. [cit. 27.06.2019]. Dostupné z: <https://www.airportwatch.org.uk/2013/03/silverjet-flights-grounded/>
- [46]. Air Traffic Control. How does Heathrow alternate arrival paths. [online]. [cit. 05.07.2019] Dostupné z: <https://aviation.stackexchange.com/questions/62528/how-and-when-does-heathrow-alternate-arrival-paths>

- [47]. Paris Charles De Gaulle Runways. [online]. [cit. 27.11.2019]. Dostupné z: <https://simpleflying.com/paris-runway-plane-parking/>
- [48]. National Air Traffic Services. Time Based Separation. [online]. [cit. 09.06.2020] Dostupné z: <http://www.nats.aero/tbs/>
- [49]. TBS Crew briefing resources. NATS. [online]. [cit. 27.09.2020]. Dostupné z: <https://www.nats.aero/services-products/products/intelligent-approach/tbs-crew-briefing-resources/>
- [50]. AIM. Wake Turbulence. Federal Aviation Administration [online]. [cit. 28.09.2020]. Dostupné z: https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap7_section_4.html
- [51]. ČHMÚ. [online]. [cit. 15.10.2020]. Dostupné z: <https://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/ceska-republika/stanice/profesionalni-stanice/prehled-stanic/praha-ruzyne?l=cz>
- [52]. Air traffic control. [online]. [cit. 15.10.2020]. Dostupné z: <https://www.howitworksdaily.com/air-traffic-control-how-do-they-keep-our-skies-safe/>
- [53]. Pražské letiště patří v Evropě k nejvíce zasaženým opatřeními kvůli koronaviru - Deník.cz. [online]. [cit. 20.07.2020]. Dostupné z: <https://www.denik.cz/regiony/letiste-dovolena-cestujici-letadlo-provoz.html>

10 Přílohy

PŘÍLOHA 1: Elektronická verze v Excelu „měření a výpočty“.