



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

Katedra letecké dopravy

Návrh vertikální trajektorie příletových a odletových tratí na LKPR
Design of the Vertical Trajectory for Arrival and Departure Routes at LKPR

Bakalářská práce

Studijní program: Profesionální pilot

Vedoucí práce: Ing. Terézia Pilmannová, MBA

Šimon Hrdlička

Praha 2024

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621.....Ústav letecké dopravy

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Šimon Hrdlička

Studijní program (obor/specializace) studenta:

bakalářský – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Návrh vertikální trajektorie příletových a odletových tratí na LKPR**

Název tématu (anglicky): Design of the Vertical Trajectory for Arrival and Departure Routes at LKPR

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je navrhnout optimální vertikální trajektorii příletových a odletových tratí na dráhu 24 na LKPR s tím, že by umožnila co nejplynulejší klesání a stoupání v souvislosti s organizací vzdušného prostoru a převažujícím typem provozu.
- Analyzujte možnosti stanovení optimálního vertikálního klesání/stoupání pro různé typy letounů v souvislosti s efektivitou letu a provozními postupy.
- V souvislosti se stávající situací v TMA Praha navrhnete optimální vertikální profily pro SID a STAR na/z dráhy 24 a jejich implementaci do provozních postupů leteckého dopravce.
- Navrhnete scénáře pro ověření možného přínosu návrhu pro leteckou společnost.
- Proveďte validaci návrhů v prostředí simulátoru ATC Escape light.
- Výsledky validace zhodnoťte a diskutujte.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Procedures for Air Navigation Services (PANS) - Aircraft Operations - Volume II Construction of Visual & Instrument Flight Procedures (Doc 8168)
Performance Based Navigation (PBN) Manual (Doc 9613)
AIP - Letecká Informační příručka ČR

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Terézia Pilmannová, MBA**

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2023**
(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: **5. srpna 2024**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Šimon Hrdlička
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 5. října 2023



Abstrakt

V moderním letovém provozu je pro všechny jeho složky záměrem zavádět a udržovat postupy zvyšující jeho efektivitu a zároveň tak snižovat negativní vliv letecké dopravy na životní prostředí. Jedním z opatření je implementace vertikálního profilu příletových a odletových tratí s účelem umožnit plynulý průběh letu.

Cílem bakalářské práce bylo takové postupy navrhnout na hlavní dráhu nejvytíženějšího letiště České republiky, dráhu 24 letiště Praha Ruzyně. Na existující příletové a odletové tratě byla na základě reálného provozu implementována výšková omezení, odpovídající ideálnímu vertikálnímu profilu přilétajících a odlétajících letadel.

Tato vertikální omezení splňují bezpečnostní podmínky ochranných prostorů kolem zavedených tratí dle českých a evropských předpisů a reflektují v maximální možné míře požadavky na uspořádání vzdušného prostoru s ohledem na sektorizaci. Zároveň tak vyhovují neustále se zvyšujícím nárokům na environmentální dopady a ekonomicko-provozní výhodnost.

Nově navrhované tratě byly ověřeny v simulačních prostředích BADA, ESCAPE, X-Plane a Prepar3D a porovnány s již existujícími. Byly naměřeny možnosti letadel vertikální profil dodržovat a pozitivní efekty na spotřebu paliva.

Výsledky simulací prezentovaných profilů podporují výhodnost takových postupů z hlediska ekologické čistoty a finanční úspory.

Klíčová slova: let stálým klesáním, let stálým stoupáním, standardní přístrojový odlet, standardní přístrojový přílet, vertikální profil



Abstract

In contemporary air traffic management, it is imperative for all stakeholders to implement and uphold procedures that enhance operational efficiency while mitigating the environmental impact of aviation. One such measure is the adoption of vertical profiles for arrival and departure routes to facilitate continuous flight operations.

The bachelor thesis aimed to design these procedures for the primary runway of the busiest airport in the Czech Republic, Runway 24 at Prague Ruzyne Airport. Based on actual traffic data, level restrictions were applied to existing arrival and departure routes, aligning with the optimal vertical profiles for incoming and outgoing aircraft.

These vertical restrictions comply with buffer zone requirements around established routes as per Czech and European regulations and reflect, as far as possible, the criteria for airspace organisation taking sectorisation into account. Additionally, they address the growing demands for environmental sustainability, economic viability, and operational efficiency.

The newly proposed routes were validated using simulation environments such as BADA, ESCAPE, X-Plane, and Prepar3D, and were compared with existing routes. The simulations assessed the aircraft's ability to adhere to the vertical profiles and measured the positive impacts on fuel consumption.

The simulation results underscore the advantages of these procedures in terms of environmental sustainability and financial savings.

Keywords: continuous climb operations, continuous descent operations, standard instrument arrival, standard instrument departure, vertical profile



Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval své vedoucí práce paní Ing. Terézii Pilmannové, MBA, odbornému konzultantovi Stanleyemu Schmidtovi, kolegům Janu Fialovi a Jindřichu Šiklovi a v neposlední řadě Ing. Michaele Zemanové, Ph.D. během psaní a sestavování této práce.

Za cenné připomínky, podporu, trpělivost a celkový rozvoj mojí osobnosti patří má vděčnost všem, včetně mé rodiny, a to nejen při psaní této práce, ale během celého studia.



Čestné prohlášení

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

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

V Praze dne 4. srpna 2024

Podpis



Obsah

Úvod	11
1 Teoretické základy práce	12
1.1 Vertikální navigace	15
1.2 Postupy CDO a CCO	16
1.3 Přehled současného stavu v zahraničí	18
1.4 Přehled současného stavu na letišti Praha Ruzyně	19
1.5 Limitace současného stavu	24
2 Metody	26
2.1 Charakteristika provozní situace pro tvorbu návrhu	27
2.2 Analýza a modelování horizontálních tratí	27
2.2.1 Výpočet průsečíku dvou ortodromických tratí	27
2.2.2 Speciální případ: Průsečíky tratí se zatáčkou	31
2.2.3 Ohraničení průsečíku	31
2.3 Analýza a modelování vertikálních tratí	33
2.4 Implementace do simulačních prostředí	36
2.4.1 Implementace do systému ESCAPE	36
2.4.2 Validace postupů z pohledu leteckého dopravce	37
3 Prezentace výsledků	39
3.1 Průsečíky a fixy	39
3.2 Vertikální omezení	42
3.2.1 Intersection 1	44
3.2.2 Intersection 2	45
3.2.3 Intersection 3	46
3.2.4 Intersection 4	47
3.3 Výsledný návrh	47
3.4 Simulace v systému ESCAPE	50
3.5 Data z leteckých simulátorů	52
4 Diskuze výsledků	54
5 Závěr	57
Seznam použité literatury	58



Seznam obrázků

1.1	Příklady zatáček se specifickými poloměry (RF a FRT)	13
1.2	Ilustrace open & closed tratí standardních přístrojových příletů (STAR)	14
1.3	Ilustrace různých možností provedení strategické de-konfliktnosti tratí	16
1.4	Schematický obrázek aplikace CDO/CCO na let	17
1.5	Varování na mapách odletových tratí z EGLL	18
1.6	Ilustrace křížení tratí EGLL	19
1.7	Horizontální rozsah TMA a CTR letišť v České republice	20
1.8	Ilustrace křížení odletových a příletových tratí dráhy 24 letiště Praha Ruzyně	21
1.9	Ilustrace příletových tratí na dráhu 24 letiště Praha Ruzyně	22
1.10	Ilustrace odletových tratí z dráhy 24 letiště Praha Ruzyně	23
2.1	Ilustrace metod použitých při výzkumu	26
2.2	Funkce <i>intersection</i> v prostředí Matlab	30
2.3	Ohraničení úseku tratě	32
2.4	Ohraničení úseku tratě se zatáčkou	33
2.5	Grafické zobrazení vertikálního profilu reálného provozu na LKPR	34
2.6	Grafické zobrazení regrese vertikálního profilu reálného provozu na LKPR	35
2.7	Ilustrace zadávání souřadnic nových bodů a vertikálních omezení do systému ESCAPE	36
3.1	Schematická mapa poloh bodů Intersection a Level na příletových a odletových tratích dráhy 24	40
3.2	Ilustrace boxplotu vertikálního profilu provozu na LKPR	42
3.3	Ilustrace boxplotu vertikálního profilu provozu na LKPR v porovnání s BADA	43
3.4	Boxplot vertikálního profilu na průsečíku Intersection 1 (INT1)	44
3.5	Boxplot vertikálního profilu na průsečíku Intersection 2 (INT2)	45
3.6	Boxplot vertikálního profilu na průsečíku Intersection 3 (INT3)	46
3.7	Boxplot vertikálního profilu na průsečíku Intersection 4 (INT4)	47
3.8	Navrhovaná mapa standardních přístrojových příletů na dráhu 24	48
3.9	Navrhovaná mapa standardních přístrojových odletů z dráhy 24	49
3.10	Grafické zobrazení vertikálního profilu provozu na LKPR před zavedením vertikálního profilu simulovaného v prostředí ESCAPE	51
3.11	Grafické zobrazení vertikálního profilu provozu na LKPR po zavedení vertikálního profilu simulovaného v prostředí ESCAPE	51



3.12 Grafické zobrazení vertikálního profilu provozu B737-800 na LKPR před zavedením vertikálního profilu simulovaného v prostředí X-Plane	53
3.13 Grafické zobrazení vertikálního profilu provozu B737-800 na LKPR po zavedení vertikálního profilu simulovaného v prostředí X-Plane	53



Seznam tabulek

1.1	Symboly výškových omezení	15
2.1	Nejčastější typy letadel na LKPR za rok 2019	38
3.1	Průsečíky odletových a příletových tratí	39
3.2	Body zaručující dodržení rozstupu 5 NM od okolního provozu	41



Seznam symbolů a zkratek

ADS-B	Automatic Dependent Surveillance–Broadcast
AMSL	Výška nad střední hladinou moře (Above mean sea level)
ATC	Řízení letového provozu (Air traffic control)
ATCO	Řídící letového provozu (Air traffic control officer)
ATS	Letové provozní služby (Air traffic services)
BADA	Base of aircraft data
CCO	Continuous climb operations
CDA	Continuous descent approach
CDFA	Continuous descent final approach
CDO	Continuous descent operations
CTR	Řízený okrsek (Control zone)
DER	Odletový konec dráhy (Departure end of the runway)
DME	Dálkoměrné zařízení (Distance measuring equipment)
ESCAPE	EUROCONTROL simulation capabilities and platform for experimentation
ETP	Earliest turning point
FL	Letová hladina (Flight level)
GNSS	Globální družicový polohový systém (Global navigation satellite system)
IAF	Fix počátečního přiblížení (Initial approach fix)
IATA	Mezinárodní asociace leteckých dopravců (International Air Transport Association)
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví (International Civil Aviation Organization)
INS	Inerciální navigační systém (Inertial navigation system)
IRS	Inerciální referenční systém (Inertial reference system)
LKPR	ICAO kód letiště Praha Ruzyně
LTP	Nejpozdější bod pro točení (Latest turning point)
PBN	Navigace založená na výkonnosti (Performance based navigation)
PDG	Návrhový gradient pro daný postup (Procedure design gradient)
PRG	IATA kód letiště Praha Ruzyně
RNAV	Prostorová navigace (Area navigation)
RNP	Požadovaná navigační výkonnost (Required navigation performance)
ŘLP	Řízení letového provozu
TAS	Pravá vzdušná rychlost (True airspeed)
TMA	Koncová řízená oblast (Terminal control area)
VKV/VHF	Velmi krátké vlny (Very high frequency)
VOR	VKV všesměrový radiomaják (VHF omnidirectional range)



Úvod

Přesnost navigace letadel je nezbytným předpokladem bezpečného provozu. Zatímco v minulosti se pro navigaci spoléhalo především na pozemní navigační zařízení, současný trend směřuje k využívání navigace založené na výkonnosti (PBN). PBN umožňuje přesnější a flexibilnější vedení letadel, přesto stále existují určité situace, ve kterých se vyžaduje použití konvenčních navigačních prostředků.

Při provozu letadel na tratích potřebují mít piloti a řídicí letového provozu jistotu, že na nich letadla zůstanou jak v příčném, tak ve vertikálním směru. Letiště Praha Ruzyně navigace PBN již využívá pro definici všech svých tratí odletových a příletových, kde je zabezpečená jistota, že se letadla udrží v požadovaných horizontálních mezích.

Tato práce se zaměřuje na zvýšení úrovně bezpečnosti a efektivity letového provozu tím, že přináší návrh vertikálního profilu standardních tratí pro nejužívanější dráhu v Praze, dráhu 24. Cílem je, aby letadla na těchto tratích setrvala v požadovaných, předem stanovených vertikálních mezích. Tyto meze jsou ovlivněny nejen limitacemi samotných letadel, ale také okolním provozem, uspořádáním vzdušného prostoru a požadavky řídicích letového provozu. V současné době je prostor pro zlepšení na pražském letišti právě ve vzniku nového vertikálního profilu, který bude těmto potřebám vyhovovat v maximální možné míře.

Piloti využijí meze jako vodítko, v jakých hladinách by se měli na tratích nacházet. Dle toho uzpůsobí vertikální rychlost na hodnotu, aby letadlo nemuseli převádět do horizontálního letu. Řídicím ubývá část pracovní zátěže, kterou jinak věnují postupnému vydávání povolení ke klesání a stoupání jednotlivým letadlům.

Propojením spolupráce leteckých posádek a řízení letového provozu lze dosáhnout vertikálních omezení, která budou v souladu s optimalizačními standardy organizace Eurocontrol pro systemizaci a strategickou dekonflikci vzdušného prostoru. Letadla tak více využijí postupů, při kterých dochází k úspoře paliva, snížení opotřebení leteckých pohonných jednotek a redukci emisí. Navíc, lepší vzájemné porozumění mezi jednotlivými účastníky povede k plynulejšímu a efektivnějšímu řízení letového provozu. Takové postupy, již užívané v zahraničí, posouvají pražské letiště mezi významné evropské uzly pro lety z celého světa a přináší nové možnosti.



1 Teoretické základy práce

V civilním leteckém provozu se většina letů provádí podle pravidel letu podle přístrojů (IFR - Instrument flight rules). Uskutečňovány jsou po předem definovaných trasách, označovaných jako *tratě letových provozních služeb (ATS)*. Ty slouží k zajištění bezpečného provozu letadel, usměrnění jeho toku a jejich ochraně před okolními překážkami. Konstrukčně musí respektovat uspořádání vzdušného prostoru a v určité míře i zabraňují snížení bezpečné vzdálenosti mezi letadly pod předepsané minimum. Liší se svými parametry a charakteristikami, avšak všechny z poskytují ochranné prostory v souladu s jejich definicí [1, 2, 3].

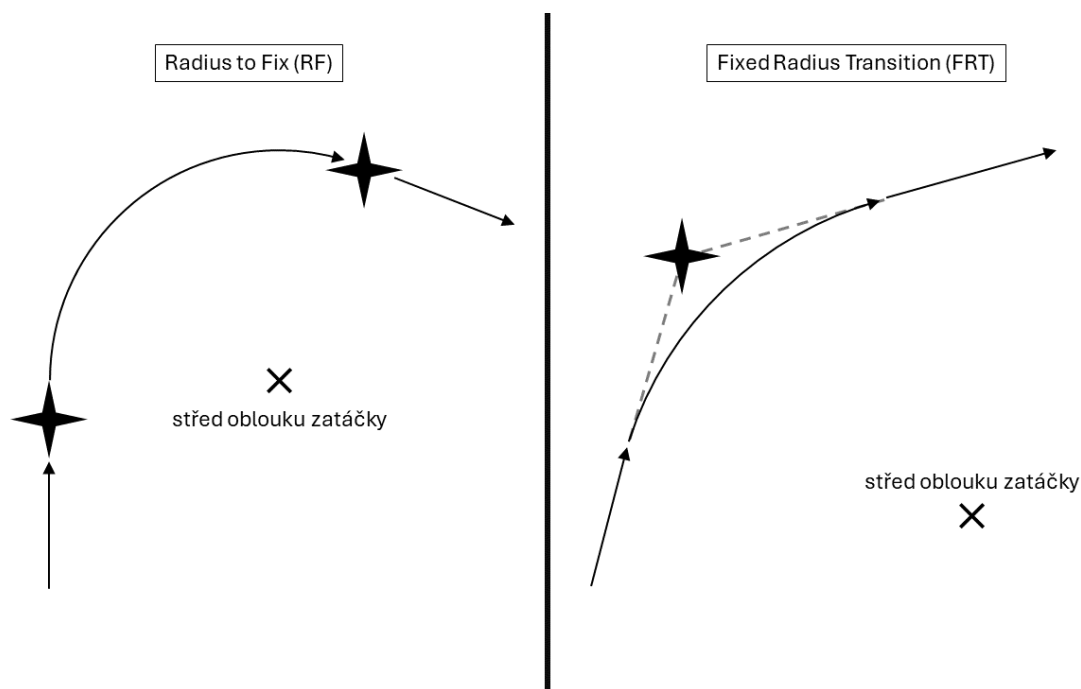
Tratě ATS již postupně nahrazovány segmenty Free Route Airspace (FRA). To je určený prostor, ve kterém být lety plánovány po volných tratích mezi určeným vstupním bodem a určeným výstupním bodem s možností použití mezilehlých bodů, bez užití struktury tratí ATS v závislosti na dostupnosti vzdušného prostoru [4, 3].

Na tratích ATS jsou poskytovány *letové provozní služby (ATS)*. Úkoly těchto služeb musí být zabraňovat srážkám letadel ve vzduchu i na provozních plochách, udržovat rychlý a spořádaný tok letového provozu, poskytovat rady a informace a vyrozumívát příslušné organizace a orgány o letadlech, po nichž se má pátrat nebo kterým se má poskytnout záchranná služba (v případě potřeby spolupracovat s těmito orgány) [3].

Zmíněné tratě již téměř všechny splňují požadavky na navigaci založenou na výkonnosti (PBN). Ta se odvolává na výkonnostní požadavky pro letadla a jejich navigační vybavení, definici a konstrukci letových tratí a infrastrukturu, která navigaci po těchto tratích umožní. Pod PBN se řadí specifikace prostorové navigace (RNAV) a navigace založené na výkonnosti (RNP), které umožňují let po jakékoliv požadované trati, definované zeměpisnými souřadnicemi. Let není tedy omezen pouze na polohu vůči pozemním radionavigačním zařízením, ale dokáže vyhodnocovat okamžitou polohu letadla téměř kdekoli v téměř reálném čase. Specifikace se liší v požadavcích na přesnost určení okamžité polohy, schopnost tuto přesnost monitorovat a případně další doplňující kritéria [5].

Požadavky na přesnost určení polohy jsou tím vyšší, čím menší je hodnota navigační specifikace. Například pro specifikaci RNAV 1 to znamená, že celková systémová chyba určení polohy nesmí být více než 1 NM (námořní míle) v 95 % času. Rozdíl mezi specifikacemi RNAV a RNP je právě ve schopnosti navigačního systému monitorovat aktuální přesnost určení polohy a v případě degradace této přesnosti na to upozornit posádku [6]. Mezi další kritéria a požadavky, která mohou být na RNAV/RNP tratích, patří například požadavky na schopnost letadla letět po trati se specifickými poloměry zatáček, jak je znázorněno na obrázku 1.1,

nebo požadavky na konkrétní zdroje navigační informace (GNSS, DME/DME, VOR/DME, INS, IRS) [5].



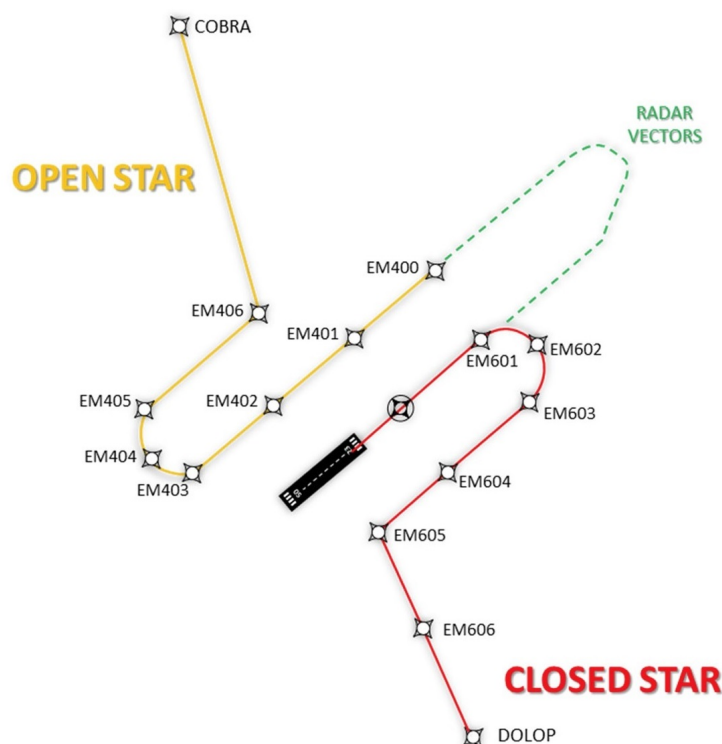
Obrázek 1.1: Ilustrace zatáček se specifickými poloměry (RF a FRT). Vlastní ilustrace, informace z příručky PBN od Eurocontrol [5].

Tato práce je primárně zaměřena na pohyby letadel po tratích příletových a odletových, na kterých je požadována nejčastěji specifikace RNAV 1, kde obvykle nejsou žádné dodatečné funkce vyžadovány [6].

Příletovými tratěmi jsou myšleny tratě standardních přístrojových příletů (STAR - Standard instrument arrival), které spojují poslední traťový bod (význačný bod IFR) s bodem, ze kterého lze zahájit přístrojové přiblížení [7]. Tímto bodem bývá bod počátečního přiblížení (IAF).

Příletové tratě se pak dále dělí na tzv. otevřené a uzavřené (open and closed STARs). Ty se liší ve způsobu zakončení postupu. Otevřené příletové tratě mají poslední bod nejčastěji v poloze po větru dráhy, na kterou bude následovat přístrojové přiblížení. Na tomto posledním bodě bývá vyznačeno, že pilot by měl pokračovat aktuálním kurzem, přičemž následovat bude radarové vektorování řídicím letového provozu (ATCO) [5]. Během radarového vektorování řídicí předává instrukce, jaký magnetický kurz má letadlo udržovat a přebírá navigační vedení letadla. Tím zodpovídá za rozstupy od překážek, prostorů a okolního provozu. Uzavřené příletové tratě poskytují traťové vedení nejčastěji až do usazení letadla na trati konečného přiblížení. Rozdíl mezi těmito dvěma druhy příletů lze vidět na obrázku 1.2.

Piloti většinou preferují uzavřenou STAR, kvůli možnosti včasného plánování klesání a potřebného úhlu klesání. Ne vždy je však možné, kvůli okolnímu provozu, kompletní uzavřenou STAR zaletět bez dodatečných omezení. Řídicí upřednostňují metodu otevřených příletových tratí, která jim umožní mít situaci pod kontrolou, čímž se stává jednodušším a efektivnějším vytváření sledu letadel na přiblížení.



Obrázek 1.2: Ilustrace open & closed tratí standardních přístrojových příletů (STAR). Převzato z příručky PBN od Eurocontrol [5].

Odletové tratě jsou zde tratě standardních přístrojových odletů (SID - Standard instrument departure), které spojují letiště, nebo danou dráhu na letišti, s význačným bodem IFR, na kterém začíná traťová fáze letu [7]. SID je však pouze jednou z možností, jak lze tohoto význačného IFR bodu dosáhnout. Existují i alternativní způsoby odletu (např. odlet přímý, vizuální nebo všesměrový), které ale nejsou tématem pro tuto práci a tudíž nebudou dále podrobněji rozebírány [2].

Rozměry ochranných prostorů kolem tratí závisí na požadované navigační výkonnosti, zdroji dat prostorové navigace (GNSS, VOR/DME, DME/DME), letěné trati (SID, STAR, počáteční přiblížení, traťový let...) a na vzdálenosti od letiště. Například pro RNAV 1 se šířka ochranného prostoru pohybuje mezi 1 až 5 NM vpravo i vlevo od publikované tratě [8]. Schopnost letadla se po takové trati pohybovat bez opuštění ochranného prostoru je věcí



horizontální navigace. Druhou složkou prostorové navigace je navigace vertikální, kterou se dále zabývá kapitola 1.1.

1.1 Vertikální navigace

V letectví je prostorová navigace čtyřdimenzionální disciplínou, ve které se kloubí laterální a vertikální navigace s rychlostí a časem. Všechny tyto parametry jsou klíčové nejen k bezpečnému provozu, ale i k jeho plynulosti. Z těchto parametrů je v této bakalářské práci nejvíce prostoru věnováno právě vertikální navigaci. Ta je stěžejní zejména ve fázích odletu z letiště určení a přiletu do destinace, kdy letadlo překoná za relativně krátký úsek mnoho hladin.

Vertikální navigace je schopnost letadla pohybovat se s jistou přesností v požadovaných výškových limitacích na trati [6]. Tyto limitace bývají definovány zejména minimálním požadovaným gradientem, nebo hladinovými omezeními na traťových bodech. Tato omezení mohou mít různý formát, většina se však drží standardu, který používá i americká společnost Jeppesen (poskytující navigační informace) v jejich mapách, viz tabulku 1.1.

Tabulka 1.1: Symboly výškových omezení z Introduction to Jeppesen navigation charts [9]

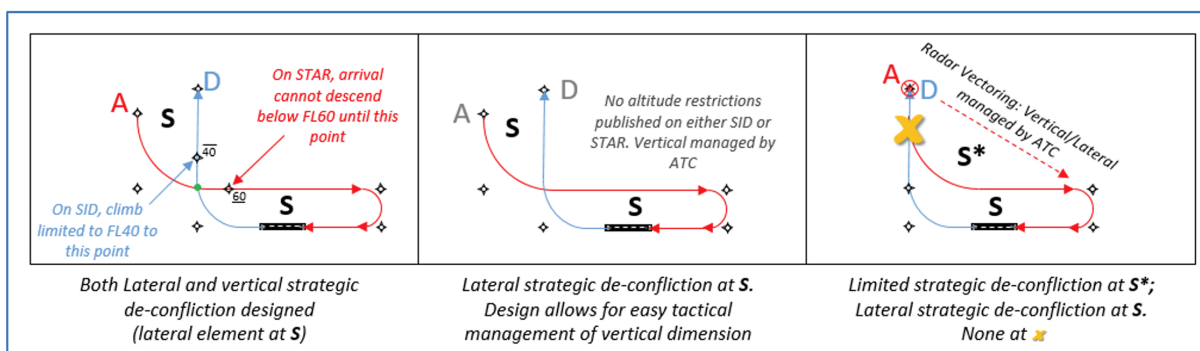
Zobrazení	Výškové omezení
<u>8000</u>	Minimální hladina
$\overline{8000}$	Maximální hladina
8000	Doporučená hladina
$\overline{8000}$	Povinná hladina
$\overline{8000}$	Maximální hladina
$\overline{12000}$ $\overline{10000}$	Mezi hladinami

Existuje více důvodů, proč je potřebné se vertikální navigaci věnovat. Je-li přihlédnuto k přísným požadavkům na bezpečnost provozu, tak do té se řadí hlavně potřeba zajistit požadovanou minimální bezpečnou výšku nad překážkami, udržet vertikální rychlost v požadovaných limitech letadla a zajistit rozstup mezi jednotlivými letadly [7, 6].

S přibývajícými technologickými možnostmi v leteckém průmyslu se zvyšuje i jeho bezpečnost a momentálně je na nejvyšší úrovni v historii [10]. Pozitivní efekty technologického rozvoje se také projevují na bezpečnosti ve smyslu doplnění lidského faktoru v letectví, který je jinak nejčastějším důvodem letecké nehody a to až v 68 % případů [11]. Vertikální omezení na tratích tak mohou doplnit povědomí pilotů o poloze letadla vůči překážkám, prostorům a

provozu, kterému je potřeba se vyhnout. Toto větší povědomí tak posádkám uvolňuje mentální kapacitu, která může být posléze k dispozici pro aktivní sledování dalších parametrů letu.

Prostorová navigace umožňuje konstruktérům tratí již přemýšlet, aby tyto tratě nebyly navzájem konfliktní. Takovýto cíl se pak nazývá *strategická de-konfliktnost tratí*, přičemž existuje více možností, jak toho dosáhnout. Mezi ty dvě nejsostikovanější možnosti se řadí 2D (laterální) a 3D (laterální i vertikální) strategická de-konfliktnost tratí, která počítá s letadly, které dodržují jak trať letu, tak výšková omezení na této trati [12]. Názorně to ukazuje obrázek 1.3. V takovém případě se z řídicího stává primárně pozorovatel, který zasáhne v případě, že by se letadlo odchýlilo od vydaného povolení a separace dána konstrukcí tratě by nemohla být dodržena. Dále by řídicí zasahoval v případě nestandardního provozu a počasí.



Obrázek 1.3: Ilustrace různých možností provedení strategické de-konfliktnosti tratí. Převzato z příručky pro separaci PBN tratí od Eurocontrol [12].

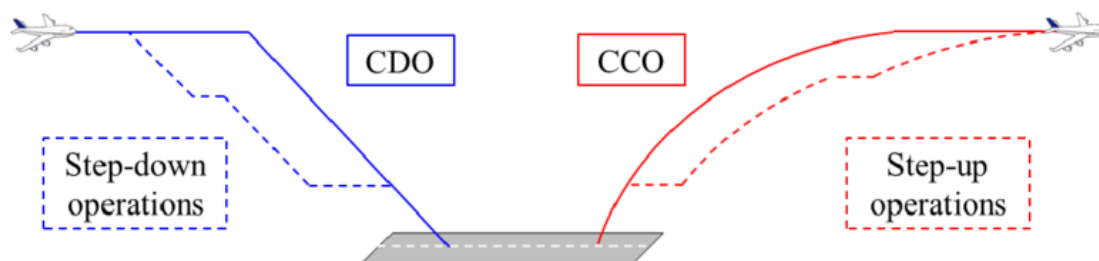
V případě, že by letadlo nebylo schopno vertikální profil z jakéhokoliv důvodu dodržet, řídicí by se vždy mohl uchýlit k již zavedené metodě 2D strategické de-konfliktnosti tratí. V takovém případě by byl využit pouze horizontální profil dané tratě a klesání a stoupání by záviselo na povolení ATCO. Při neschopnosti letadel letět po tratích, například při absenci RNAV systému prostorové navigace, bylo by mu zajištěno radarové vektorování.

Řídicí při využívání metody 3D strategické de-konfliktnosti tratí ušetří v průměru 7 % času na frekvenci tím, že zredukuje množství vyslaných povolení až o 22 % [13]. Uspořený čas tak může využít k jiné činnosti, jako například efektivnější vytváření sledu přiblížení.

1.2 Postupy CDO a CCO

Velmi důležitou procedurou v provozních postupech jsou *Continuous descent operations* (CDO) a *Continuous climb operations* (CCO). Tyto postupy jsou důležitým tématem nejen kvůli snižování spotřeby paliva a produkce emisí, ale i kvůli snižování hlukového znečištění [14, 15]. Jedná se o techniky, které jsou umožněny celkovým návrhem vzdušného prostoru. Zároveň by

měly být usnadňovány poskytovaným řízením letového provozu [16]. Cílem je dosažení změny vertikální polohy letadla po optimálním profilu s minimální složkou horizontálního letu, jak je znázorněno na obrázku 1.4. To vše je umožněno bez negativního vlivu na bezpečnost [16].



Obrázek 1.4: Schematický obrázek aplikace CDO/CCO na let. Převzato z disertační práce [17].

Letadla aplikující CCO využívají optimální tah motorů a rychlost pro stoupání až do dosažení cestovní hladiny. Při CDO letadla používají minimální tah motorů, ideálně v kombinaci s konfigurací s nejnižším odporem, od bodu zahájení klesání až do bodu konečného přiblížení.

Jak popisuje výzkum z čínské univerzity v Nanjing publikovaný IEEE, zavedení a optimalizace CDO/CCO dokáže snížit emise a spotřebu paliva o vyšší jednotky až o nižší desítky procent (podle metody konkrétně použité) [18].

Taktéž, jak popisuje Tasos Nikoleris v článku publikovaném v Journal of Aircraft, je palivově úspornější začít klesání z cestovní hladiny na přiblížení již se sníženou rychlostí, raději než vkládat do klesání úsek horizontálního letu v nižších hladinách pro zbrzdění letadla [19].

Neméně důležitá je i kapacita prostoru, ve kterém se letadlo pohybuje. Pokud je i se zavedenými CDO/CCO postupy překročena maximální kapacita prostoru, není možné vždy klesat letadla po standardních tratích. V krajních případech dochází ke zdržení ve vyčkávacích obrazcích. V nich letadla standardně sníží rychlost na rychlost nejmenšího odporu v_{MD} kvůli minimalizaci spotřeby paliva. Letadla jsou klesána vždy postupně do nejnižší volné hladiny pod nimi a na přiblížení jdou v pořadí, v jakém přiletěla do vyčkávacího obrazce, nebo tak, aby to bylo provozně výhodné s maximálním počtem odbavených letů za co nejkratší časovou jednotku. V takovém případě je horizontální let nevyhnutelný z důvodu zachování minimálního vertikálního rozstupu mezi letadly v obrazci. Dalším důvodem, kdy není za každých okolností možné CDO/CCO trajektorie dodržet, je aktuální stav počasí. To se promítá jak do možností letadla klesat a stoupat [15], tak do nutnosti letu mimo tratě pro vyhnutí se bouřkám, námraze, turbulenci apod.



Specifickým případem CDO je *Continuous Descent Approach* (CDA), někdy také nazývaný *Continuous Descent Final Approach* (CDFA), který využívá optimální sestupové roviny již od počátku klesání. Tato rovina odpovídá určité vertikální rychlosti, která je pro každé letadlo odlišná a zajišťuje, že během konečného přiblížení nebude segment, kdy by letadlo neklesalo [2].

V praxi je každé 3D přiblížení CDA, protože letadlo má nejpozději v bodě konečného přiblížení vždy k dispozici vertikální vedení. To poskytuje sestupovou rovinu s konstantním úhlem klesání (standardně 3°). Také v případě 2D přiblížení lze aplikovat postup CDA. Pilot ručně zvolí počáteční vertikální rychlost a následně sleduje nadmořskou výšku požadovanou v konkrétní vzdálenosti od dráhy a konzultuje ji s reálnou výškou letadla jaké v této vzdálenosti dosáhlo. Pokud vyhodnotí, že se nachází nad sestupovou rovinou, zvýší nastavenou vertikální rychlost. Vyhodnotí-li naopak, že se nachází pod sestupovou rovinou, tak zmírní rychlost klesání, ale nikdy nepřejde do horizontálního letu. Přiblížení technikou CDFA dnes již vyžaduje mnoho smluvních států. Zvyšuje totiž bezpečnost přiblížení díky snížení pracovní zátěže pilota a snížení možnosti chyb při provádění přiblížení [2].

1.3 Přehled současného stavu v zahraničí

V současnosti se vertikální omezení vyskytují na mnoha mezinárodních letištích nejen v Evropě, ale i mimo po světě. Příkladem mohou být postupy ve Velké Británii a Francii [20, 21]. Vzhledem na uspořádání vzdušného prostoru a množství provozu, které jej využívají, je možnost manévrování značně omezena. Je tedy vyloženě žádoucí, aby letadla letěla po standardních tratích.

Tyto postupy jsou zavedeny například pro londýnské letiště Heathrow. Příletové tratě končící na IAF OCKHAM (VOR/DME OCK) a BIGGIN (VOR/DME BIG) mají nejnižší hladinu FL70. Nejvyšší hladina odletových tratí je pak vždy 6000 ft AMSL [20], aby bylo zajištěno minimum vertikálního rozstupu 1000 ft od přilétajícího provozu. V těchto mapách je i několikrát konkrétně specifikováno varování z obrázku 1.5 [20].

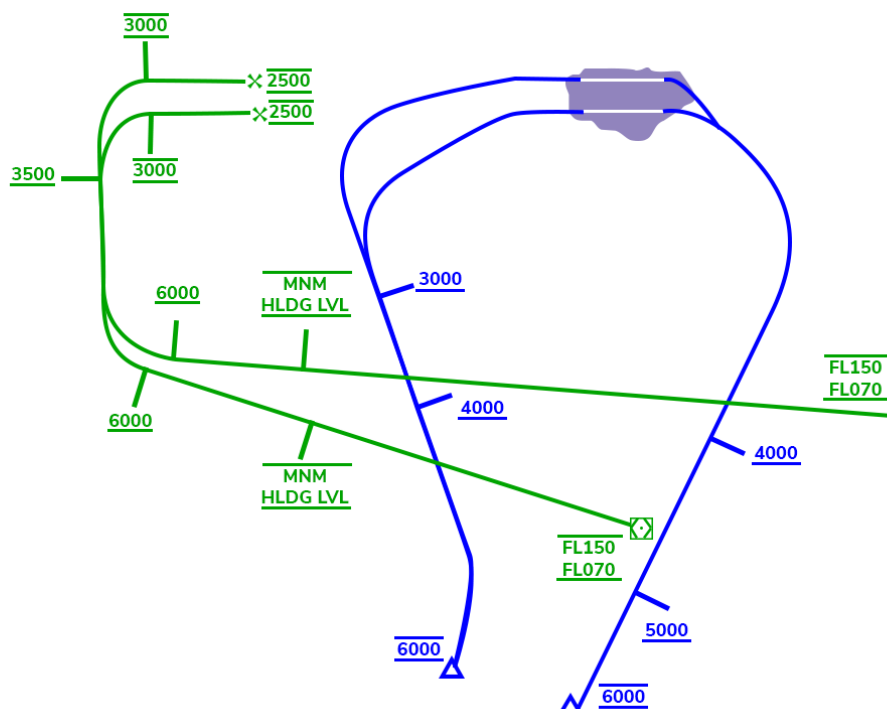
WARNING

Due to interaction with other routes **do not climb** above **6000** until cleared by ATC.

Obrázek 1.5: Varování na mapách odletových tratí z EGLL, informace převzaty z AIP UK [20].

Počáteční přiblížení obsahuje důmyslný sled výškových omezení, které mají zajistit jak rozstup od provozu na odletu, tak dodržení protihlukových omezení a minimalizovat hlukové

znečištění. Na těchto tratích se lze navíc setkat s novým typem vertikálního omezení "MNM HLDG LVL"(minimum holding level). Na bodech počátečního přiblížení se totiž předpokládá, že letadla vyčkávají ve vyčkávacích obrazcích a poté na tomto vertikálním omezení musí přesně dodržet nejnižší hladinu přidělenou ve vyčkávacím obrazci. Přehledná ilustrace na obrázku 1.6 zvýrazňuje, jak se tyto tratě kříží s tratěmi odletovými. I proto je v těchto mapách počátečního přiblížení specifikováno, že CDA by mělo být aplikováno, kdykoliv je to možné [20].



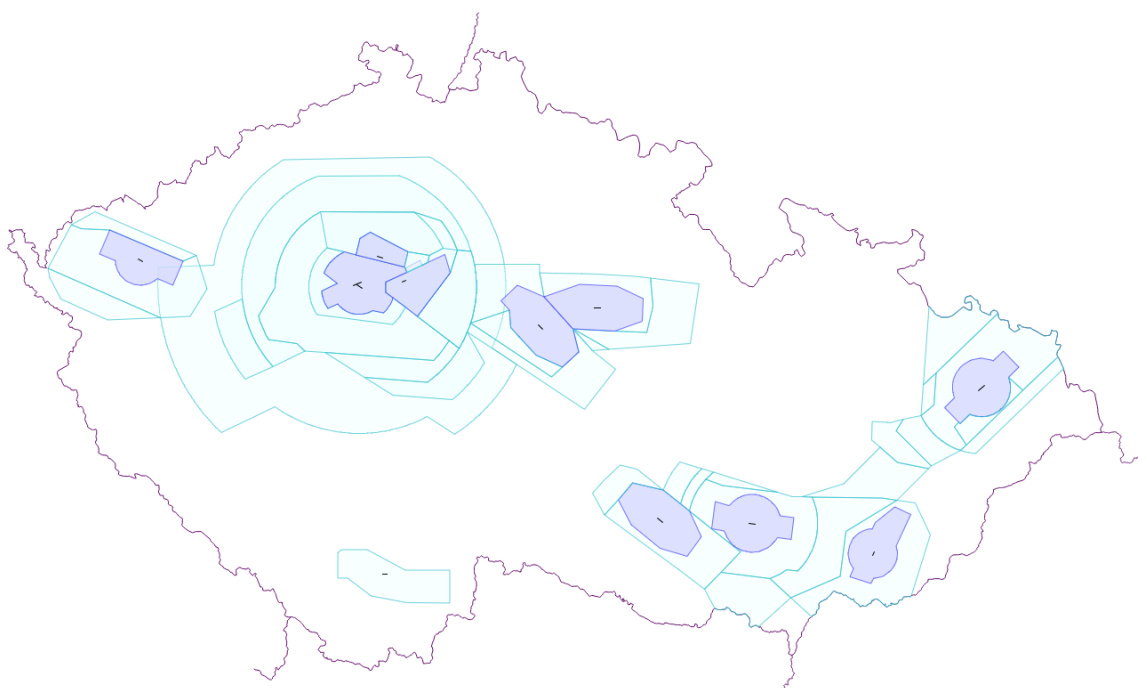
Obrázek 1.6: Ilustrace křížení tratí odletových (modře) s tratěmi počátečního přiblížení (zeleně) na londýnském letišti Heathrow. Pro přehlednost záměrně ponechány pouze trajektorie tratí a výšková omezení. Vlastní ilustrace, informace převzaty z AIP UK [20].

1.4 Přehled současného stavu na letišti Praha Ruzyně

Letiště Praha Ruzyně je postupově v mnoha ohledech podobné dalším velkým letišťům v Evropě. Například výše zmiňovanému Heathrow.

Kolem letiště se rozprostírá řízený okresek letiště (CTR - control zone) Ruzyně s vertikálním rozmezím od země až do nadmořské výšky 3500 ft a horizontálním rozmezím znázorněným na obrázku 1.7. Řízený okresek je řízeným prostorem třídy D, který je určen primárně k ochraně letištního provozu [7, 4]. Stanoviště poskytující služby ATS je v CTR Ruzyně TWR Ruzyně s volacím znakem Ruzyně Tower.

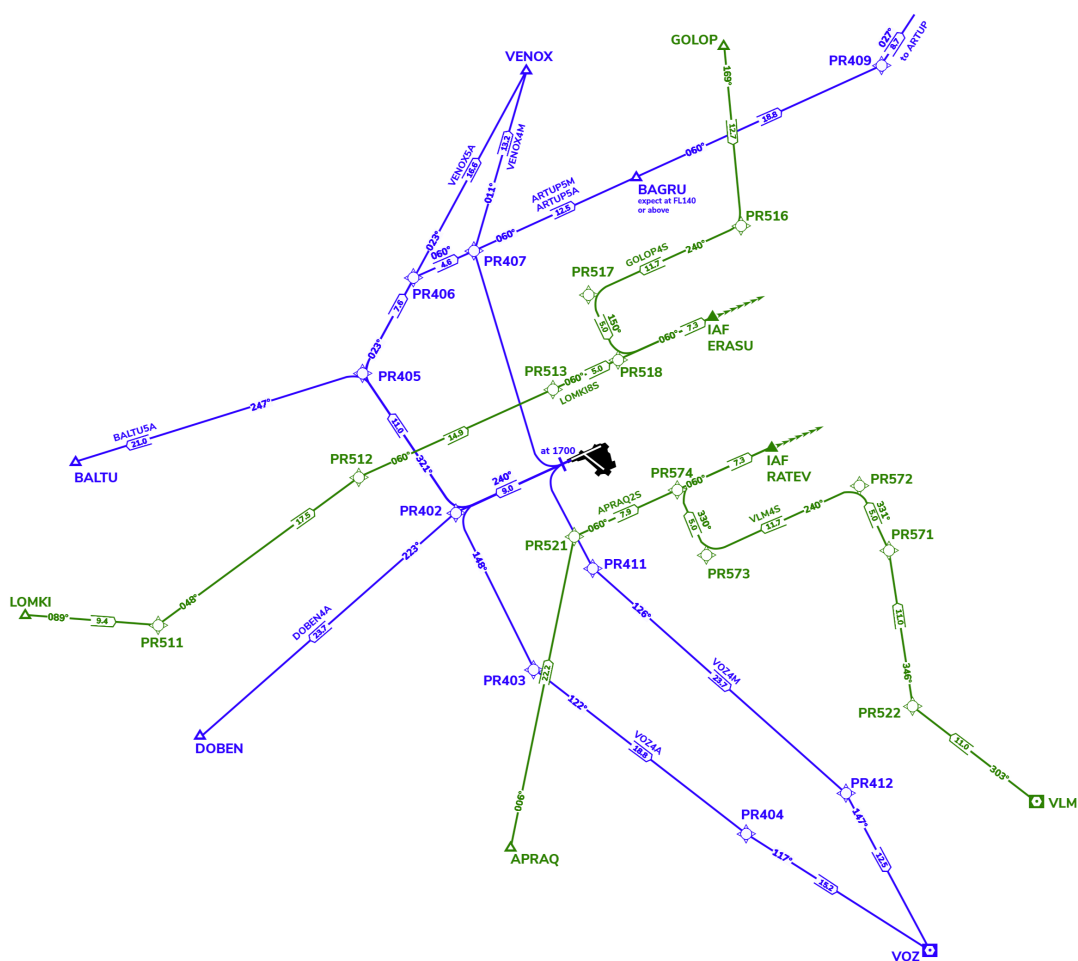
Na řízený okrsek plynule navazuje koncová řízená oblast (TMA - terminal control area), která je v místech, kde se sbíhají tratě letových provozních služeb [4]. TMA Praha svým horizontálním rozmezím zasahuje také dle obrázku 1.7. Vertikální rozsah není všude uniformní. Zatímco horní hranice je vždy FL165, dolní hranice se mění primárně v závislosti na vzdálenosti od letiště. Proto je blízko u letiště, kde se letadla pohybují nízko, dolní hranice TMA I Praha už 2500 ft AMSL. Nejvyšší TMA, TMA IX Praha, má dolní hranici mnohem výše a to FL95. Tvar TMA Praha tedy připomíná obrácenou pyramidu/trychtýř. Služby ATS zde poskytuje APP Praha s volacím znakem Praha Radar [4].



Obrázek 1.7: Horizontální rozsah TMA (světle modře) a CTR (tmavě modře) Prahy a dalších přístrojových letišť České republiky. Mapa převzata z Aisview ŘLP a upravena pro vlastní potřeby [22].

Poskytování služeb ATS je prostřednictvím koordináční dohody delegováno na APP Praha rovněž v západní části sektoru MT, nazývané HDO box. Tato veřejně nepublikovaná část vzdušného prostoru má vertikální rozsah nad FL95 až do FL125. Sektor MT, který jinak spadá pod oblastní středisko řízení letového provozu ACC Praha, pokrývá severovýchodní část republiky.

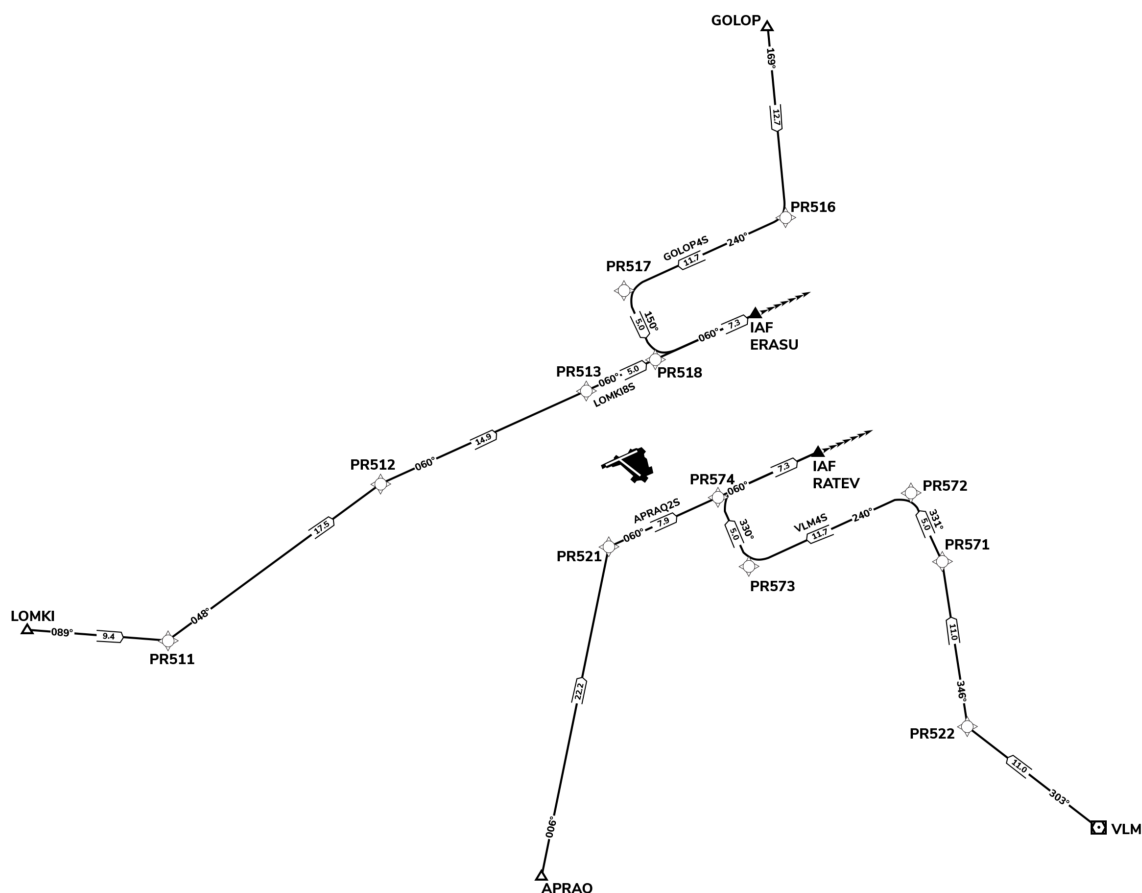
Letiště disponuje přístrojovými přiblíženími, přílety a odlety pro všechny své přistávací a vzletové dráhy. Tato práce se zaměřuje na dráhu 24, která je z hlediska provozu nejvytíženější [4]. Pro ilustraci je na obrázku 1.8 uvedena mapa znázorňující tratě přístrojových příletů a odletů pro danou dráhu.



Obrázek 1.8: Ilustrace křížení odletových (modře) a příletových (zeleně) tratí dráhy 24 letiště Praha Ruzyně. Vlastní ilustrace, informace z AIP CZ [4].

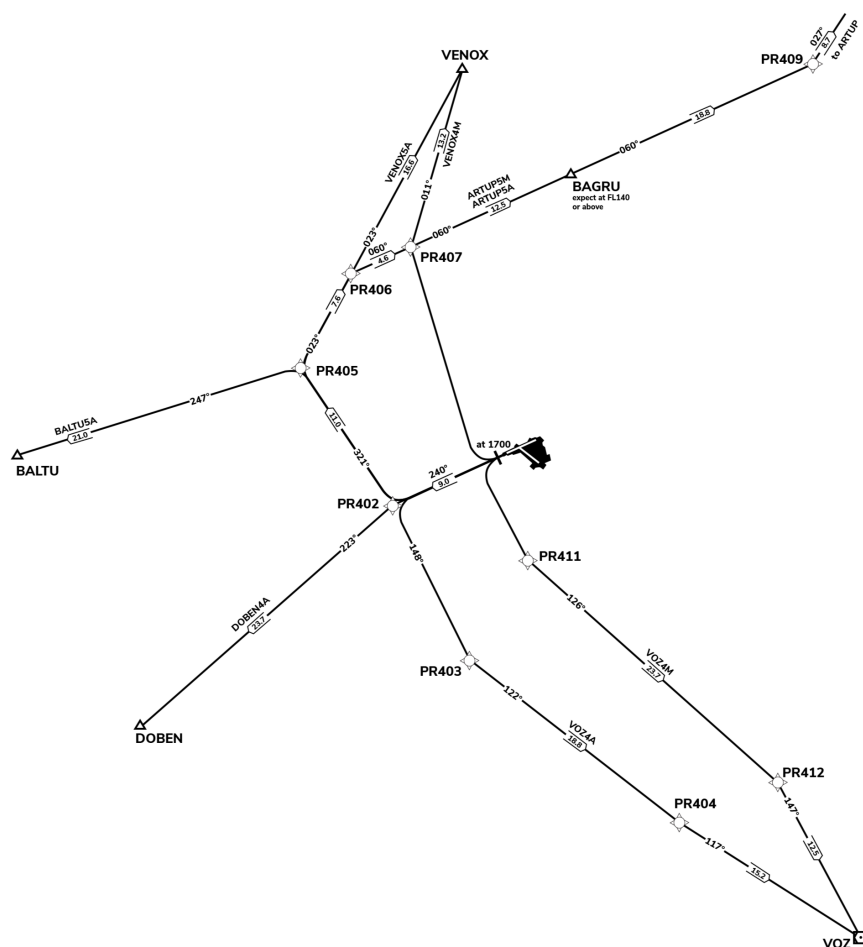
Tratě standardních přístrojových příletů začínají na bodech GOLOP, LOMKI, APRAQ a na VOR/DME VLM (Vlašim). Požadovaná navigační výkonnost je RNAV 1. Tyto tratě jsou formou open STAR [5], končící na fixech počátečního přiblížení ERASU a RATEV. Neobdrží-li posádka jiné povolení od ATCO, bude letadlo pokračovat tratí v opačném směru tratě konečného přiblížení příletové dráhy a čekat na zahájení vektorování pro přiblížení. Příletové tratě na dráhu 24 jsou zobrazeny na obrázku 1.9.

Kromě radarového vektorování existuje i možnost, kdy letadlo může po dosažení fixů ERASU a RATEV pokračovat na povolení řídicího po trati přístrojového přiblížení. Tyto tratě, nazývané tratě počátečního a středního přiblížení, jsou navrženy tak, aby letadlo dovedly až k fixu konečného přiblížení s požadovanou navigační výkonností RNAV 1.



Obrázek 1.9: Ilustrace přiletových tratí na dráhu 24 letiště Praha Ruzyně. Vlastní ilustrace, informace z AIP CZ [4].

Odletové tratě začínají v odletovém konci dráhy (DER - Departure end of the runway), což je bod na konci dráhy ve směru vzletu, nebo, pokud má dráha předpolí, na konci předpolí. Konec odletových tratí je v Praze standardně na traťových bodech ARTUP, VENOX, BALTU, DOBEN a na VOR/DME VOZ (Vožice). I u těchto tratí je požadovaná navigační výkonnost RNAV 1. Na některých odletových tratích z dráhy 24 je v Praze již vertikální omezení implementováno. To však pouze u standardních odletových tratích se zatáčkou, kde je první zatáčka definována nejnižší hladinou pro točení. V tomto případě je tato hladina 1700 ft AMSL [23]. Tato vertikální restrikce nezohledňuje v žádném případě omezení vzdušného prostoru, ani přilétající provoz do Prahy. Ilustrace odletových tratí je na obrázku 1.10.



Obrázek 1.10: Ilustrace odletových tratí z dráhy 24 letiště Praha Ruzyně. Vlastní ilustrace, informace z AIP CZ [4, 23].

Standardní situace u většiny provozu z a na LKPR vypadá následovně. Součástí odletových povolení letu IFR je standardní odletová trať a nadmořská výška počátečního stoupání 5000 ft. Odletová trať je běžně přidělena dle prvního traťového bodu v letovém plánu. Tento bod by měl být totožný s posledním bodem odletové tratě. Pokud se jedná o vrtulové letadlo, bývá mu přidělena odletová trať pro vrtulová letadla (pokud na tento bod odletová trať pro vrtulová letadla existuje). V době nočního klidu, který nastává mezi 22. a 6. hodinou místního času, tyto tratě zanikají. Výjimkou jsou tratě pro vrtulová letadla z dráhy 06, které se využívají i v noci [4, 23].

Pro stoupání nad 5000 ft AMSL vydává povolení řídicí letového provozu stanoviště APP Praha (letadlo se nachází v TMA Praha – prostoru třídy C). Ten letadlu zajišťuje také rozstup od okolního provozu a od prostorů odpovědnosti jiných řídicích. Poslední přidělená hladina tímto řídicím bývá standardně FL140 pro vrtulová letadla a FL160 pro proudová letadla, nebo jejich cestovní hladina, pokud je tato nižší. Poté letadlo přechází na ACC Praha. S proudovými



letadly má oblastní řídicí povinnost stoupat výše a letovou hladinu 160 přidělenou řídicím APP Praha plynule uvolnit [24].

Přilétající IFR provoz přechází na frekvenci APP Praha v klesání do FL170 (proudová letadla) nebo FL150 (vrtulová letadla) s již přidělenou příletovou tratí. Výjimkou jsou letadla přilétající ze severu přes traťový bod GOLOP. Ta při příletu na dráhu 24 nebo 12 přechází na frekvenci APP Praha v klesání již do FL130 kvůli dekonflikci s odletovými tratěmi z těchto drah [24].

Příletové tratě se již dále nedělí na tratě pro proudová nebo vrtulová letadla. S ohledem na uspořádání vzdušného prostoru, sektorizaci a provozní situaci dostává pilot povolení ke klesání postupně až do 4000 ft AMSL – výšky středního přiblížení na jednu z drah LKPR [24].

1.5 Limitace současného stavu

V současné době má velký potenciál pro zefektivnění vzájemné křížení tratí odletových a příletových, jak je vidět na obrázku 1.8. Piloti dopředu nikdy nevědí, jakou hladinu mohou na určitých bodech očekávat, kromě jednotlivých bodů přístrojového přiblížení. Na těch je žádoucí být co nejbližší k výšce středního přiblížení, aby přiblížení bylo stabilizované a nehrozil případný postup nezdařeného přiblížení. Jiné body, kromě těchto bodů a bodů pro točení na odletových tratích se zatáčkou, hladiny specifikované nemají. To vede piloty k plánování stoupání a klesání podle optimálního profilu pro snížení spotřeby paliva a maximalizaci rychlosti letu.

Pokud však letadlo klesá po optimální křivce klesání, jeho hladina na křížení tratí může být nebezpečně blízko hladině letadla, které stoupá po optimální křivce. Tomu zabrání řídicí letového provozu zajištěním vertikálního rozstupu mezi letadly. Z bezpečnostních důvodů se obě letadla ustálí v dané hladině a čekají na povolení k dalšímu stoupání/klesání. Tomuto se říká hovorově "zalevelování", z anglického *level off* = *vyrovnat* nebo *dorovnat*, přičemž právě toto má velký dopad na efektivitu letu, spotřebu paliva, emise a zcela to zanedbává principy CDO/CCO [16, 18].

Proto je snaha v této práci dosáhnout kompromisu a letadla na křížení tratí od sebe vertikálně odseparovat již předem. A to zavedením bodů s vertikálními omezeními již do příletových a odletových tratí a jejich map. Tato metoda se tak přiblíží co nejvíce ke 3D strategické de-konfliktnosti tratí, jak je popsáno v kapitole 1.1 [12].

S narůstajícím množstvím a zátěží leteckého provozu dochází k poklesu jeho efektivitu. To se projevuje neplynulostí odbavování letů. Řídicí letového provozu, jejichž primární úkol spočívá v zajištění bezpečnosti, v takovýchto situacích čelí nutnosti regulovat množství a délku jednotlivých vysílání. V důsledku toho se letadla mohou ocitnout v situaci, kdy jsou nuceny



z bezpečnostních důvodů udržovat danou hladinu namísto plynulého stoupání/klesání, čímž dochází k dalším a narušení plynulosti provozu.

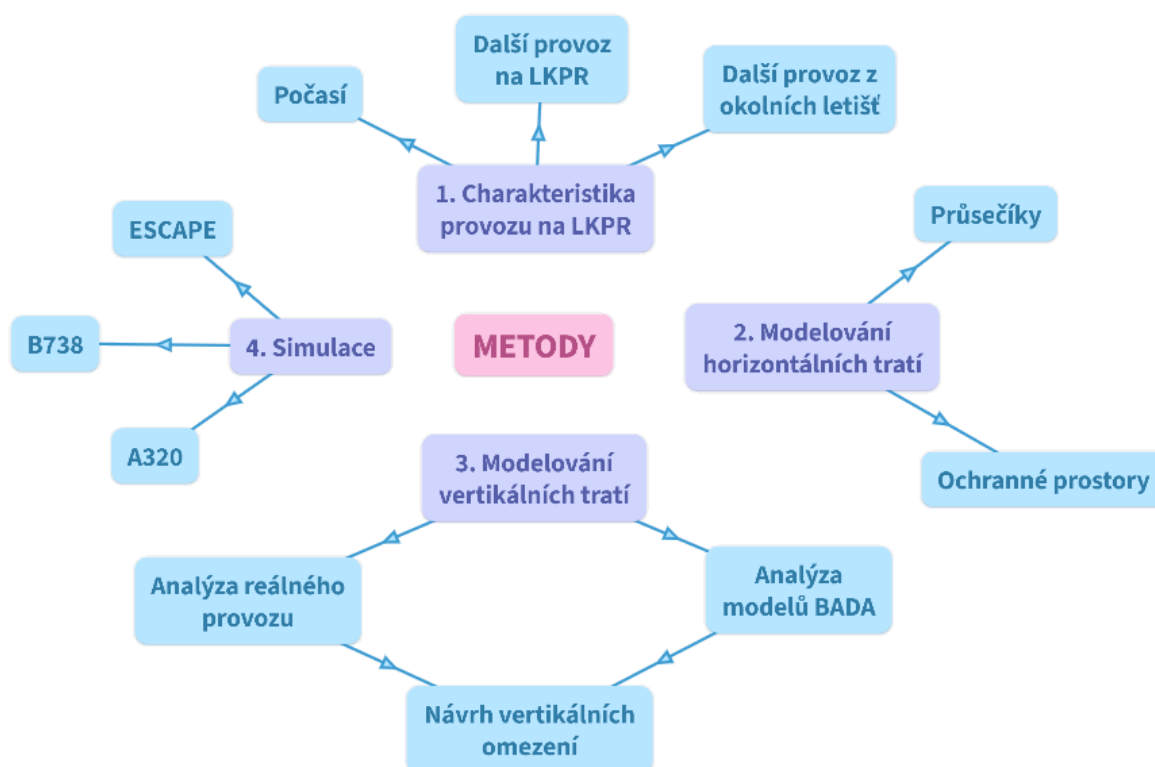
Cokoliv bude nějak optimální pro piloty, nemusí být vždy optimální pro řídící a vice versa. Tento nesoulad vytváří metaforické protipóly, kdy platí, že čím více svobody, volnosti nebo plynulosti je poskytnuto pilotům, tím méně jich má řídící a naopak. Najít kompromis mezi těmito póly je otázkou nejen enviromentální a ekonomickou, ale i filozofickou. Co ještě je přiměřené a co už ne? Kde se nachází rovnováha vhodná dané situaci?

V následujících kapitolách bude tedy snaha najít konsenzus mezi všemi dotčenými stranami a posunout vzdušný prostor v blízkosti LKPR na úroveň moderních světových letišť.

2 Metody

Tato kapitola se zabývá metodikou návrhu a validace vertikálního profilu letu s cílem optimalizovat trajektorii letadel a minimalizovat rizika v daném vzdušném prostoru. Proces se skládá ze čtyř klíčových kroků.

Prvním je popis provozu, jaký se v prostoru pohybuje včetně specifík, které se v okolí LKPR nacházejí. Druhým krokem je výpočet klíčových bodů na trati, ve kterých budou implementována omezení. Třetí krok zahrnuje výpočet vertikálních omezení. Pro každý klíčový bod z druhého kroku se na základě dat z reálného provozu a simulací vypočítají vertikální limity. Tyto limity definují maximální a minimální výšku, ve které se letadlo může v daném bodě nacházet. Čtvrtým a posledním krokem je implementace a validace. Vypočítaná vertikální omezení se implementují do simulačních prostředí a validují se z hlediska jejich efektivity a bezpečnosti. V rámci validace se simuluje provoz s implementovanými omezeními a bez nich a analyzují se výsledky, jako je dodržování limitů, spotřeba paliva a celková efektivita trajektorie. Na základě výsledků validace je provedena finální úprava a optimalizace vertikálního profilu. Příkladem takové optimalizace může být posunutí některých bodů, definujících vertikální omezení.



Obrázek 2.1: Ilustrace metod použitých při výzkumu. Vlastní ilustrace v programu OrgPad.



2.1 Charakteristika provozní situace pro tvorbu návrhu

Tato kapitola je již konkrétně zaměřena na příletové a odletové tratě letiště Praha Ruzyně (ICAO: LKPR, IATA: PRG) dráhy 24, jak jsou popsány v kapitole 1.4. Nejvíce omezující pro provoz na těchto tratích je okolní provoz na a z LKPR. Ten, pokud letí po standardních tratích, však bude zahrnut do návrhu vertikálního profilu na tratích. Následujícím omezujícím faktorem je další provoz letišť v blízkosti nebo pod TMA Praha a CTA 1 Praha (Vodochody, Kbely apod.). Ten většinou není pravidelný a nelze ho nijak standardizovat. Posledním výrazným omezením pro provoz na standardních tratích je počasí, které se také nedá standardizovat. Je nezbytné počítat s tím, že při výskytu význačných jevů počasí (déšť, bouřky, turbulence, námraza atd.) budou letadla nucena odklonit se z tratě a těmto jevům se vyhnout. Zde již bude nutné přistoupit k radarovému vektorování pro zachování bezpečnosti.

2.2 Analýza a modelování horizontálních tratí

2.2.1 Výpočet průsečíku dvou ortodromických tratí

Nejkratší vzdálenost mezi dvěma body na povrchu koule je kružnice se středem ve středu koule. Taková kružnice se nazývá ortodroma. Je důležité brát v potaz to, že Země není dokonale kulatá. Její tvar (geoid) je spíše než ke kouli, přirovnáván k rotačnímu elipsoidu, který je využíván i v kartografii [25]. Také se předpokládá, že letadla s PBN navigační specifikací RNAV 1, která je pro příletovou trať STAR do Prahy požadována, tuto trať letí po ortodromických úsecích mezi jednotlivými traťovými body [8, 26, 27].

Cílem této kapitoly je určit způsob výpočtu, kterým jsou nalezeny průsečíky některých těchto úseků s úseky na odletových tratích. Tím jsou určeny přesné souřadnice, ve kterých se tyto tratě kříží a ke kterým se lze později vrátit kvůli výpočtům výkonnostních charakteristik letadel, zejména jejich schopností stoupat a klesat. Využívá se zde informací o takzvané sferické trigonometrii, která je předmětem vyšší geodézie [28, 29].

Pro začátek výpočtu je potřeba ověřit, že všechny úseky, mezi kterými se hledaný průsečík nachází, mají nenulovou délku. V případě nulové délky – neexistuje řešení.

Ve výpočtu je nutné pracovat se zeměpisnými souřadnicemi v radiánech. Důležitou podmínkou je prvně vyjádření souřadnic v soustavě desítkové. Pokud to tak není, převod ze soustavy sexagesimální (šedesátkové) je následující [30]:

$$DD^{\circ}mm'ss'' = DD + \frac{mm}{60} + \frac{ss}{3600} \quad (2.1)$$



Souřadnice v tomto formátu jsou převedeny na radiány dle rovnice 2.2, kde ϕ představuje zeměpisnou šířku a λ zeměpisnou délku.

$$\begin{pmatrix} \phi \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{lat} \cdot \frac{\pi}{180} \\ \text{lon} \cdot \frac{\pi}{180} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Další převod je do kartézské soustavy souřadnic, kde dva úseky ortodromických tratí jsou vyjádřeny čtyřmi body: P_1 , P_2 , P_3 a P_4 . Tyto body jsou vyjádřeny v souřadnicích zeměpisné délky a šířky v radiánech. Převod do kartézské soustavy souřadnic je následující:

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N(\phi) \cos \phi \cos \lambda \\ N(\phi) \cos \phi \sin \lambda \\ \frac{b^2}{a^2} N(\phi) \sin \phi \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Zde je poloměr křivosti v rovině kolmé na poledník (příčný poloměr křivosti) $N(\phi)$ vypočítán následovně:

$$N(\phi) = \frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi + b^2 \sin^2 \phi}} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (2.4)$$

Proměnné a , b jsou nazvány hlavní a vedlejší poloosa meridiánové elipsy. Konstanta e je poté (první) excentricita. Hodnoty a , b , e jsou závislé na referenčním geodetickém systému. Pro mezinárodní letectví je to systém WGS-84 dle předpisu L15 [31]. Tento systém je popsán v dokumentu ICAO World Geodetic System – 1984 (WGS 84) Manual (Doc 9674), kde lze nalézt i hodnoty a , b , e [27].

$$a = 6\,378\,137 \text{ m}$$

$$b = 6\,356\,752,31425 \text{ m}$$

$$e = 8,1819190842622 \cdot 10^{-2}$$

Pro určení průsečíku je potřeba zjistit průsečík dvou rovin, kterých jsou tyto ortodromy součástí. Tento průsečík bude mít formu přímky, která, protínajíc povrch elipsoidu, určuje 2 body na elipsoidu. Obecná rovnice roviny:

$$ax + by + cz = 0 \quad (2.5)$$

Z bodů P_1 a P_2 (určující úsek první ortodromy) je vytvořen vektor \vec{V}_1 a z bodů P_3 a P_4 je vytvořen vektor \vec{V}_2 .

$$\vec{V}_1 = P_1 \times P_2 = \begin{pmatrix} v_{1x} \\ v_{1y} \\ v_{1z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 z_2 - y_2 z_1 \\ x_2 z_1 - x_1 z_2 \\ x_1 y_2 - x_2 y_1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Z vektorů \vec{V}_1 a \vec{V}_2 vychází jednotkový vektor \vec{U}_1 a \vec{U}_2 (jednotlivé složky vektoru jsou vyděleny jeho délkou), jak lze vidět v rovnicích 2.7.



$$|\vec{V}_1| = \sqrt{v_{1x}^2 + v_{1y}^2 + v_{1z}^2}$$

$$\vec{U}_1 = \begin{pmatrix} u_{1x} \\ u_{1y} \\ u_{1z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v_{1x}}{|\vec{V}_1|} \\ \frac{v_{1y}}{|\vec{V}_1|} \\ \frac{v_{1z}}{|\vec{V}_1|} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

S využitím jednotkových vektorů lze také ověřit, jestli zkoumané ortodromy neleží ve stejné rovině. A to pokud platí rovnice 2.9 pro $\varepsilon \approx 0$.

$$\varepsilon \approx 0 \begin{cases} |u_{1x} - u_{2x}| < \varepsilon \\ |u_{1y} - u_{2y}| < \varepsilon \\ |u_{1z} - u_{2z}| < \varepsilon \end{cases} \quad (2.8)$$

Pokud tato nerovnost platí, lze pokračovat na rovnice rovin ρ_1 a ρ_2 , kterým náleží dané ortodromy a které určují průsečík.

$$\rho_1 : u_{1x}x + u_{1y}y + u_{1z}z = 0$$

$$\rho_2 : u_{2x}x + u_{2y}y + u_{2z}z = 0 \quad (2.9)$$

Roviny ρ_1 a ρ_2 se protínají v jedné přímce, která má směrový vektor \vec{D} .

$$\vec{D} = \vec{U}_1 \times \vec{U}_2 = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{1y}u_{2z} - u_{2y}u_{1z} \\ u_{2x}u_{1z} - u_{1x}u_{2z} \\ u_{1x}u_{2y} - u_{2x}u_{1y} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Této přímce již přímo náleží hledané průsečíky ortodrom. A ze směrového vektoru lze již přímo spočítat jejich zeměpisné souřadnice ve stupních dle výpočtu 2.11, kde úhel měřený od počátku soustavy souřadnic k \vec{D} je úhel θ – geocentrická šířka.

$$\tan \theta = \frac{d_y}{d_x} = (1 - e^2) \tan \lambda$$

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{d_y}{d_x (1 - e^2)} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{d_z}{\sqrt{(1 - e^2)(d_x^2 + d_y^2)}} \right) \quad (2.11)$$

Výsledným bodem je bod X o souřadnicích ϕ a λ po správném převedení zpět z radiánů na stupně.

$$X = [\phi; \lambda] \quad (2.12)$$

Celý tento výpočet byl poté zapsán v programovacím jazyce Matlab do funkce *intersection*, kde jsou vstupními parametry souřadnice bodů určujících začátek a konec ortodrom v desítkové soustavě. Výstupními parametry jsou taktéž souřadnice v desítkové soustavě průsečíku těchto ortodrom. Výsledný kód má formát z obrázku 2.2.

```
function X = intersection(fix1,fix2,fix3,fix4)
    format long

    P_decimal = [fix1(1) fix1(2);fix2(1) fix2(2);fix3(1) fix3(2);
    fix4(1) fix4(2)];
    P_radians = P_decimal.*pi/180;

    a = 6378137;
    b = 6356752.31425;
    e = 8.1819190842622*10^(-2);

    N = zeros(1,4);
    P = zeros(4,3);
    for i = 1:4
        N(i) = a/sqrt(1-e^2*sin(P_radians(i,1))^2);
        P(i,1) = N(i)*cos(P_radians(i,1))*cos(P_radians(i,2));
        P(i,2) = N(i)*cos(P_radians(i,1))*sin(P_radians(i,2));
        P(i,3) = (b^2/a^2)*N(i)*sin(P_radians(i,1));
    end

    V = [cross(P(1,:),P(2,:)); cross(P(3,:),P(4,:))];
    U = [V(1,:)/norm(V(1,:));V(2,:)/norm(V(2,:))];
    D = cross(U(1,:),U(2,:));
    X = zeros(1,2);
    X(1,2) = atan2(D(2),D(1))*180/pi;
    X(1,1) = atan((D(3)/sqrt(D(1)^2+D(2)^2))/(1-e^2))*180/pi;
end
```

Obrázek 2.2: Funkce *intersection* v prostředí Matlab.



2.2.2 Speciální případ: Průsečíky tratí se zatáčkou

Problém u dosud použitého postupu nastává v případě, kdy jsou traťové body variabilní v závislosti na výšce první zatáčky. Takovým případem jsou zde odletové tratě VOZ4M, ARTUP5M a VENOX4M pro vrtulová letadla.

Pro tento případ se využívá nejdřívější bod točení (ETP - earliest turning point), který začíná 600 metrů od začátku dráhy 24. V tomto bodě zároveň začíná ochranný prostor odletové procedury/tratě [8]. Dále se pokračuje stejně, jako u předchozích případů, kde jsou všechny fixy jasně definované. Jsou určeny průsečíky těchto tratí s tratěmi příletovými a od těchto průsečíků jsou určeny hladinová omezení.

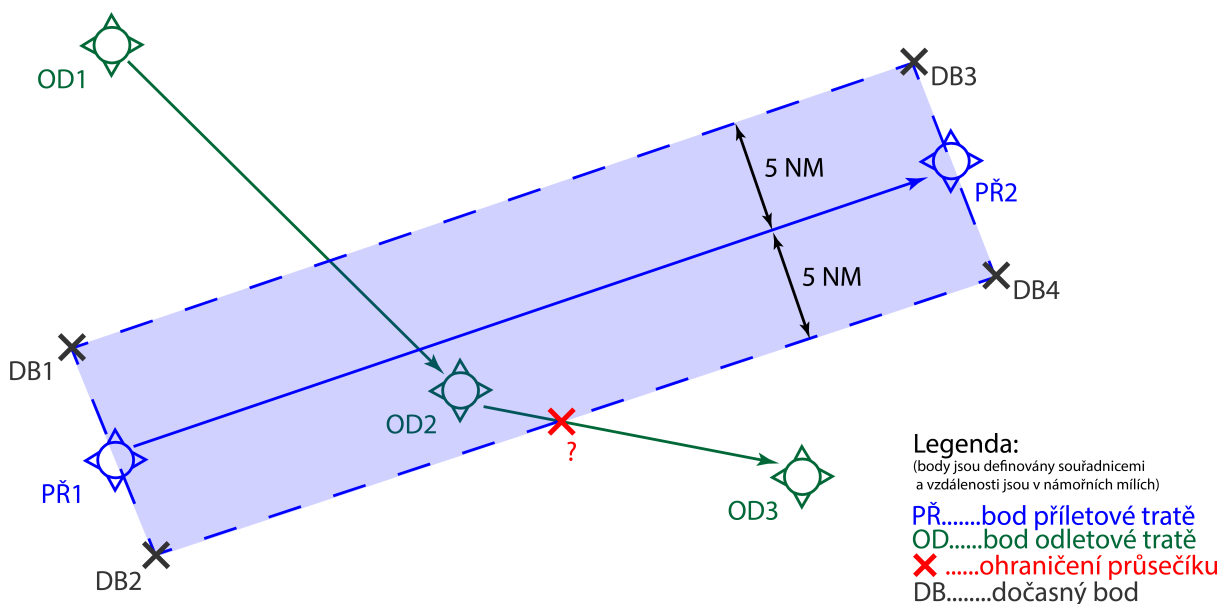
U těchto tratí s plným využitím vertikálního profilu nelze tolik počítat, jelikož letadla, která je využívají, mají velmi odlišné výkonnostní charakteristiky od běžného provozu v Praze a jsou předmětem koordinace mezi stanovišti pro co nejrychlejší zkratku či jiné napřímění, aby v prostoru strávila co nejméně času.

2.2.3 Ohraničení průsečíku

Spočtený průsečík je v ideálním případě bodem, kde by se měla letadla křížovat. Z důvodu zachování bezpečnosti nesmí ATCO vydat povolení, které by vedlo k snížení minima vertikálního nebo horizontálního rozstupu. Letadla musí nepřetržitě od sebe být vertikálně 1000 stop nebo horizontálně 5 NM. Po splnění předepsaných podmínek lze snížit horizontální minimum na 3 NM [7]. Pokud letadla komunikují s ATCO na různých pracovištích a různých kmtočtech, nelze mezi nimi snížit rozstup pod 5 NM, vyjma jasně definované případy. Tyto ale vyžadují verbální koordinaci. Ochranný prostor v této práci proto splňuje kritérium pro nesnížené minimum rozstupu. Zároveň se počítá s využíváním přehledové informace, protože právě na této je minimum 5 NM založeno.

Pro zajištění tohoto minima v jakémkoliv bodě dané tratě, včetně tolerované odchylky je potřeba najít body, které jsou od tratí vzdáleny právě 5 NM. Ty se spočítají pomocí Vincentyho rovnic, které byly publikovány v roce 1975 Thaddeusem Vincentym [32, 33]. Užití těchto rovnic je již integrováno do funkcí v prostředí Matlab. Nejdříve je určen ochranný koridor kolem každé tratě. To spočtením *dočasných bodů*, které definují každou hranici koridoru podél tratě, odsazené o 5 NM.

Pomocí nativní funkce *azimuth* v Matlabu je zadán počáteční a konečný kurz úseku ortodromické tratě. Potřebné *dočasné body*, vzdálené 5 NM od počátečního a konečného bodu úseku, jsou nalezeny funkcí *reckon*. Zjištěný azimut je použit na určení směru, kterým směrem od úseku vedou.



Obrázek 2.3: Ukázka ochranného prostoru kolem tratě bez zatáčky. Vzniklý průsečík ochranného prostoru s křížící se tratí bude předmětem vertikálního omezení. Vlastní ilustrace.

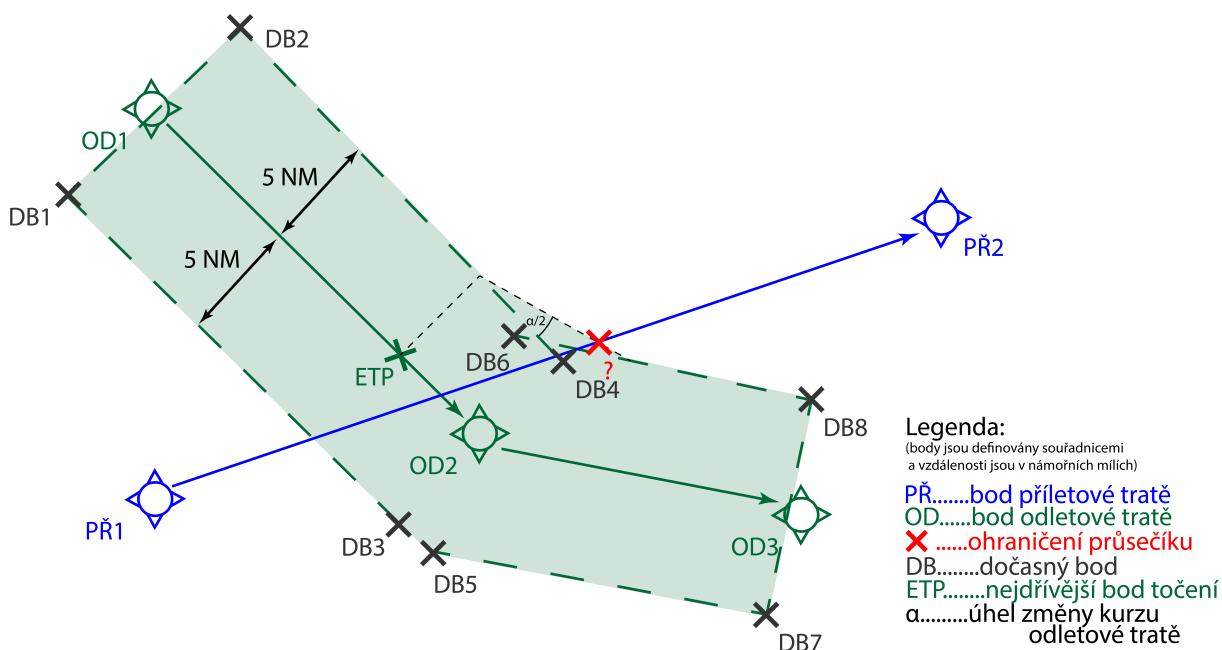
Tratě však různě zatáčejí. Kolem zatáček tak musí vzniknout dodatečný ochranný prostor, pro zajištění rozstupu 5 NM kolem fly-by i fly-over fixů. Odkázat se lze na Doc 8168 Volume II, kapitolu 2, kde je komplexně popsána tvorba ochranných prostorů zatáčky [8]. Na ochranné prostory je klíčové určení bodu ETP (earliest turning point). Na jeho úrovni je nalezen u koridoru začátek ochranného prostoru zatáčky.

Určení bodu ETP je popsáno v rovnici 2.13, kde R je rychlost zatáčení ve $^{\circ}/s$, A představuje úhel náklonu ve $^{\circ}$, v představuje rychlost (TAS) v uzlech, r představuje poloměr zatáčky v NM, α představuje změnu kurzu ve $^{\circ}$ a ATT je along track tolerance. Pro RNAV 1 i RNAV 2 traťový let, přílet, odlet, počáteční a střední přiblížení je $ATT = 0,8$ NM.

$$R = \frac{3431 \cdot \tan A}{\pi v}$$

$$r = \frac{v}{20\pi R}$$

$$d_{ETP} = r \cdot \tan \frac{\alpha}{2} + ATT \quad (2.13)$$



Obrázek 2.4: Ukázka ochranného prostoru kolem tratě se zatáčkou. Je zde viditelný efekt dodatečného ochranného prostoru kolem zatáčky na polohu bodu, který bude předmětem vertikálního omezení. Vlastní ilustrace.

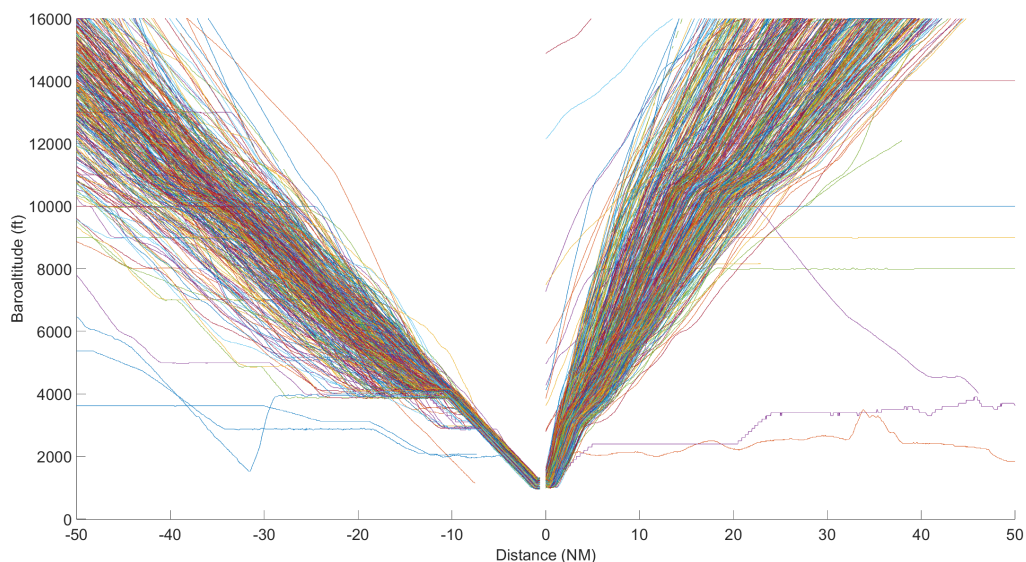
2.3 Analýza a modelování vertikálních tratí

Po určení polohy průsečíků tratí a fixů v dostatečné vzdálenosti, které budou obsahovat vertikální omezení, následuje určení těchto hodnot. Tato omezení musí být určena s dostatečnou přesností a s velkým zohledněním reálného provozu na LKPR. Proto jsou využita reálná data ze sítě OpenSky, která se zabývá sběrem dat z módu S odpovídačů sekundárního radaru a ADS-B. Tato data jsou ukládána na servery OpenSky a lze je později využít k výzkumu [34].

Data z letadel přilétajících na LKPR a z něj odlétajících byla zvolena ze dní, kdy byl zaznamenán největší provoz na letišti. Jedná se o dny na přelomu června a července (přesně 25.6. až 2.7. roku 2023). Největší provoz byl vyhledán z důvodu, že využití návrhu vertikálního profilu tratí by bylo zejména v případě velkého vytížení letiště. V takovém případě jsou letadla nucena využít celou délku příletové tratě a klesání/stoupání jim bývá v dnešní době umožněno pouze postupně, podle aktuálně volných hladin pod nimi/nad nimi.

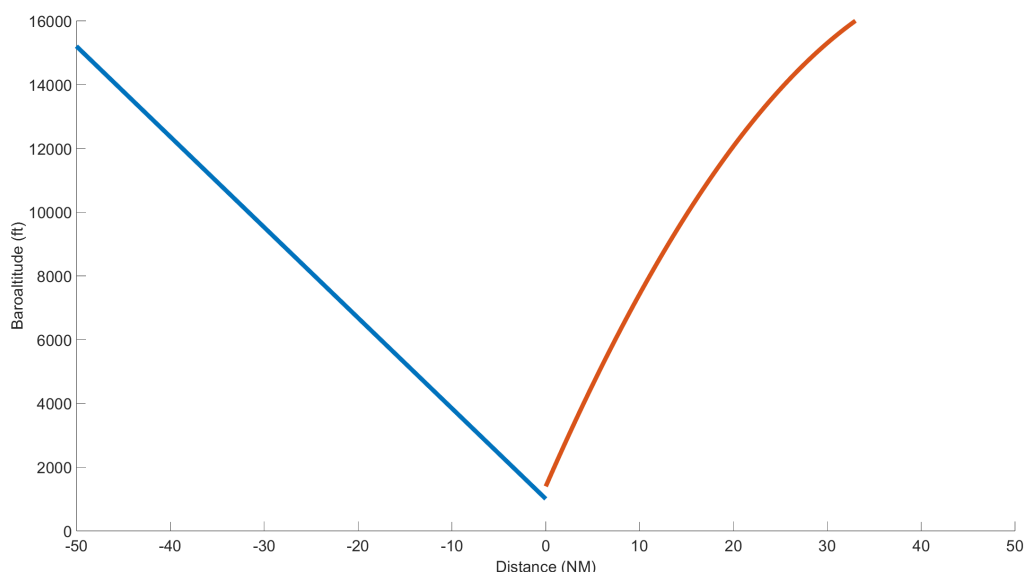
Data byla vyfiltrována, aby v nich figurovala letadla letící pouze podle IFR, která navíc vzlétala nebo přistávala na LKPR. Dále byly lety rozděleny na odlety a přílety. Grafické zobrazení na obrázku 2.5 ukazuje přehled všech příletů a odletů. Osa y představuje hladinu, ve které se letadlo nachází (ve stopách nad referenční hladinou 1013,25 hPa). Osa x pak pro

přiletý představuje vzdálenost, kterou je třeba urazit ("distance to go") do přistání. Pro odlety je na vzdálenost ose x vzdálenost od vzletu. Jedná se tedy o závislost výšky letadel na jejich vzdálenosti od vzletu/přistání.



Obrázek 2.5: Grafické zobrazení vertikálního profilu příletů (vlevo na ose x) a odletů (vpravo na ose x) na LKPR (uprostřed). Data z OpenSky, graf vytvořen v prostředí Matlab.

Pokud je těmito všemi daty proložena regresní křivka, vzniká průměrná hladina, ve které se všechna letadla nachází (viz obr. 2.6). Regresní křivkou pro přílety je přímka (klesání je zejména lineární), zatímco pro odlety je to spíše polynom druhého stupně. Tuto regresi si lze představit jako "ideální hladinu" pro všechny lety na LKPR. Proto se zejména na tato reálná data klade velký důraz, jelikož se jedná o data specificky pro toto konkrétní letiště z více než tisíce letů.



Obrázek 2.6: Grafické zobrazení regrese vertikálního profilu příletů (vlevo na ose x) a odletů (vpravo na ose x) na LKPR (uprostřed). Data z OpenSky, graf vytvořen v prostředí Matlab.

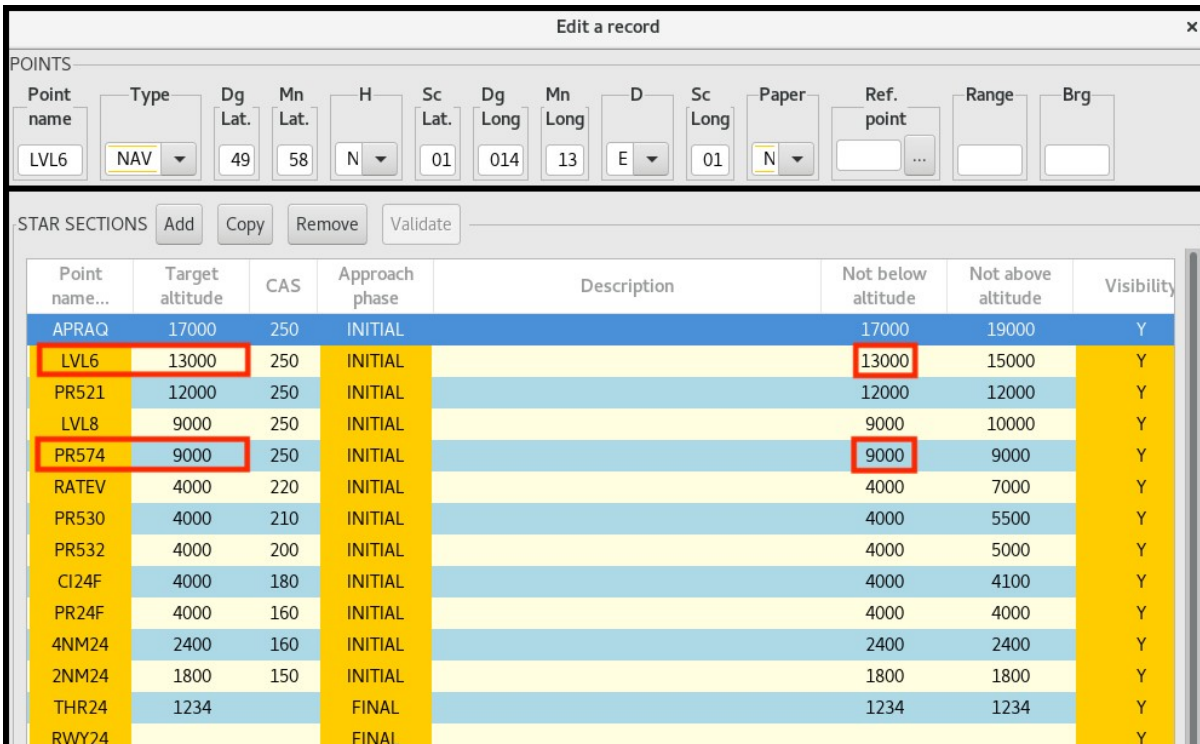
Z těchto dat lze pokračovat na určení této "ideální hladiny" na dříve zjištěných průsečících v kapitole 2.2. Aby nebyla hladina určena pouze z jedné regresní analýzy, je vytvořen pro každý průsečík boxplot, ve kterém se počítá se všemi hladinami, v jakých se na těchto průsečících nacházela všechna letadla z výše zmíněné databáze OpenSky [34].

Z těchto boxplotů se hladiny určí porovnáním mediánu a průměru se zbytkem dat. Medián tedy není jedinou směrodatnou hodnotou, podle které se vertikální omezení určuje. Omezení, která letadla budou muset dodržet se budou odvíjet od těchto "ideálních hladin" a to zaokrouhlením na nejbližší možnou letovou hladinu, příp. nadmořskou výšku (v případě vertikálního omezení pod převodní hladinou) tak, aby od sebe byly přílety a odlety vždy odseparovány minimálně 1000 ft. Omezení se poté zakreslí do map na fixy v minimální vzdálenosti 5 NM od protínajících se tratí. Pokud by tyto fixy vycházely příliš blízko jiným, již existujícím, fixům na trati, budou sloučeny. Tím se k již existujícím fixům pouze přidá vertikální omezení. Přílišná blízkost je velmi subjektivní záležitost. Minimum, které je pro tyto body přijatelné, je vzdálenost ETP z rovnice 2.13. Pokud by se body nacházely blíže, než je tato vzdálenost, hrozilo by, že letadlo nebude schopno dodržet požadované parametry zatáčky.

2.4 Implementace do simulačních prostředí

2.4.1 Implementace do systému ESCAPE

Systém ESCAPE (EUROCONTROL simulation capabilities and platform for experimentation) je komplexní a flexibilní simulační platforma taktéž vyvinuta organizací Eurocontrol pro modelování a analýzu systémů a postupů řízení letového provozu. Systém umožňuje v reálném čase simulovat širokou škálu provozních scénářů a testovat různé koncepty a technologie řízení letového provozu [24].



Point name...	Target altitude	CAS	Approach phase	Description	Not below altitude	Not above altitude	Visibility
APRAQ	17000	250	INITIAL		17000	19000	Y
LVL6	13000	250	INITIAL		13000	15000	Y
PR521	12000	250	INITIAL		12000	12000	Y
LVL8	9000	250	INITIAL		9000	10000	Y
PR574	9000	250	INITIAL		9000	9000	Y
RATEV	4000	220	INITIAL		4000	7000	Y
PR530	4000	210	INITIAL		4000	5500	Y
PR532	4000	200	INITIAL		4000	5000	Y
CI24F	4000	180	INITIAL		4000	4100	Y
PR24F	4000	160	INITIAL		4000	4000	Y
4NM24	2400	160	INITIAL		2400	2400	Y
2NM24	1800	150	INITIAL		1800	1800	Y
THR24	1234		FINAL		1234	1234	Y
RWY24			FINAL				Y

Obrázek 2.7: Ilustrace zadávání souřadnic nových bodů a vertikálních omezení do systému ESCAPE. Autorem je Jan Fiala, upraveno.

ESCAPE Light je verze simulátoru ESCAPE navržena pro menší simulace a nabízí základní funkcionality simulátoru ESCAPE v kompaktnějším a snadněji použitelném balíčku. Hlavní vlastnosti ESCAPE Light jsou zejména nižší systémové požadavky (Light lze spustit na běžných laptotech, čímž je dostupný pro širší okruh uživatelů), zjednodušené uživatelské rozhraní, přičemž však stále zahrnuje základní funkce simulátoru ESCAPE, jako je simulace en-route a terminálního provozu, modelování výkonnostních parametrů letadel a analýza dat.

Pro účely analýzy bylo nezbytné do systému integrovat nově navržené body a upravit stávající body dle požadavků. Toho bylo dosaženo importem nových bodů do softwaru ESCAPE Light. Importované body byly definovány zadáním názvu a souřadnic dle návrhu v



dialogovém okně programu. Následně byla pro každý bod zadána příslušná vertikální omezení tratě.

2.4.2 Validace postupů z pohledu leteckého dopravce

Další validace navrhované změny proběhne v simulačním systému BADA (Base of aircraft data) od Eurocontrol, zaměřený zejména na modelování výkonnosti letadel. Poskytuje rozsáhlé datové sady a teoretické modely, které umožňují realistickou simulaci chování letadel v celé oblasti provozu ve všech fázích letu. BADA je založen na nejlepších dostupných referenčních datech o výkonnosti letadel a spolupracuje s výrobcí a provozovateli letadel, aby zajistil co nejpřesnější modely.

System umožňuje simulovat klesání a stoupání letadel s vysokou mírou přesnosti, s ohledem na faktory jako typ letadla, jeho konfigurace, hmotnost a motorové parametry, meteorologické podmínky, omezení letiště a provozu na tratích. Do modelu jsou vloženy nejčastější typy letadel tvořící provoz na LKPR (vyjmenované v tabulce 2.1), jejich průměrné hmotnosti (vyšší u odletů, nižší u příletů) a další provozní omezení na tratích.

Využitím rozsáhlých datových sad a teoretických modelů BADA umožňuje optimalizaci profilu letu pro minimalizaci spotřeby paliva a emisí, posouzení bezpečnosti letových procedur, analýzu dopadu leteckého provozu na hluk a vývoj a testování systémů řízení letového provozu.

Simulované hodnoty z BADA jsou poté zapracovány do boxplotů z kapitoly 2.3 ve formě modrých bodů (terčů) a porovnány s dalšími hodnotami z reálného provozu. Podle boxplotů lze tak porovnat hodnoty navrhované analýzou reálného provozu s hodnotami BADA. V případě, že se nebudou velmi lišit (tj. o celkový rozsah boxplotu), lze navrhované hodnoty prohlásit za validní a pokračovat na další test, kterým jsou již simulace v prostředí ESCAPE Light a na leteckém simulátoru.

Záměrem těchto simulací je porovnání schopnosti letadel splnit nové požadavky na tratích z pohledu pilotů a řídicích letového provozu. Zároveň i z těchto simulací lze extrahovat informace o spotřebě paliva a porovnat je se současným stavem.

Simulace na leteckém simulátoru je pak poslední fází. Zde bude probíhat testování všech tratí na simulátoru Airbus A320 ČVUT v Praze a Boeing 737-800 v prostředí X-Plane 12. A320 na ČVUT svou výbavou odpovídá simulátoru typu BITD (Basic Instrument Training Device), není však schválen Agenturou Evropské unie pro bezpečnost letectví (EASA) pro výcvik posádek. Pro vědecké a výzkumné účely je to nástroj přijatelný. Software, na kterém celá simulace běží je Prepar3D v4, vydaný v roce 2017 [37].



Tabulka 2.1: Nejčastější typy letadel na LKPR za rok 2019 [35]

ICAO typ dle Doc 8643 [36]	Název	Podíl v %
B738	Boeing 737-800	31,8 %
A320	Airbus A320	15,8 %
A319	Airbus A319	7,7 %
AT72	ATR-72	6,9 %
A321	Airbus A321	4,8 %
DH8D	Dash-8	3,4 %
B737	Boeing 737-700	3,4 %
E190	Embraer E190	2,6 %
A20N	Airbus A320 Neo	2,1 %
B739	Boeing 737-900	2,0 %
A332/A333	Airbus A330-200/300	1,6 %
CRJ9	CRJ-900	1,3 %
B734	Boeing B737-400	1,1 %
Ostatní		15 %

BITD je typ simulátoru definovaný EASA v rámci předpisu CS-FSTD(A), který má sloužit pro základní výcvik přístrojového letu a splňuje specifické požadavky na funkčnost a vybavení. Může se jednat o jednoduchý přístrojový panel nebo o stolní trenažér, který softwarově replikuje chování přístroje, a to buď prostřednictvím dotykové obrazovky, nebo jednoduchého HMI. Může využívat letové ovládací prvky s pružinami, které poskytují výcvikovou platformu alespoň pro procedurální aspekty letu podle přístrojů [38]. Všechny tyto požadavky simulátor A320 splňuje a navíc všechny ovládací prvky a panely přesně odpovídají těm v reálných letadlech Airbus A320, pouze některé jsou na dotykových obrazovkách.

B738 byl využit zejména pro sběr dat na vyhodnocení spotřeby paliva a dalších údajů, jako jsou vertikální rychlost, indikovaná a pravá vzdušná rychlost a schopnost letadla požadovanou trať i s vertikálním profilem dodržet bez dodatečného odporu (například ve formě aerodynamických brzd). To vše před a po zavedení nových postupů s vertikálním profilem. Tato data byla měřena na B738 zejména proto, že se jedná o nejčastější typ provozu na LKPR [35].



3 Prezentace výsledků

3.1 Průsečíky a fixy

Z programu na výpočet průsečíků z kapitoly 2.2 byly určeny tyto body jako průsečíky odletových tratí s tratěmi příletovými, jak je dáno v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Průsečíky odletových a příletových tratí dráhy 24 na LKPR.

Název průsečíku	Označení	Body odletových tratí Body příletových tratí	Souřadnice průsečíku
Intersection 1	INT1	PR402 → PR405 PR512 → PR513	50° 06' 28.72"N 013° 56' 29.06"E
Intersection 2	INT2	PR403 → PR404 APRAQ → PR521	49° 50' 45.46"N 014° 10' 51.73"E
Intersection 3	INT3	1700 ft AMSL → PR407 PR512 → PR513	50° 11' 05.46"N 014° 11' 47.32"E
Intersection 4	INT4	1700 ft AMSL → PR411 PR521 → PR574	50° 01' 18.12"N 014° 15' 53.82"E

Dále byly určeny body odpovídající ochranným prostorům 5 NM kolem tratí, které jsou v tabulce 3.2. Jejich grafické znázornění je společně s průsečíky na obrázku 3.1. Specifickým je bod s názvem Level 5, který je na odletových tratích ARTUP5M a VENOX4M, které se v průsečíku INT4 kříží s tratí LOMKI8S. Jeho poloha musela být dána vzdáleností od VOR/DME OKL a to z důvodu absence předchozího fixu a proměnlivé vzdálenosti zatáčky po vzletu. První zatáčka po vzletu je totiž dána nadmořskou výškou 1700 ft, což má za následek, že letadla s lepší stoupavostí zatáčí dříve, než letadla se stoupavostí horší. Kvůli této nepřesnosti nelze ani určit přesně bod LVL5 a je nutné přistoupit k určení vertikální limitace v závislosti na vzdálenosti od vhodného radionavigačního zařízení. OKL byl vybrán, jelikož lze s velkou jistotou určit, kdy letadlo dosáhlo požadované vzdálenosti 11,5 NM, protože letí téměř přímo od zařízení a jeho rychlost vůči tomuto zařízení je velmi blízká rychlosti vůči zemi.

Vzdálenost 11,5 NM byla vypočítána na základě nejhoršího scénáře pro zajištění vyšší bezpečnosti. Letadlo začne točit v nejpozdějším bodě pro točení (*LTP* - latest turning point) od vzletu. Z tohoto bodu vede trať do PR407. Byl zjištěn fix ve vzdálenosti 5 NM od příletové tratě

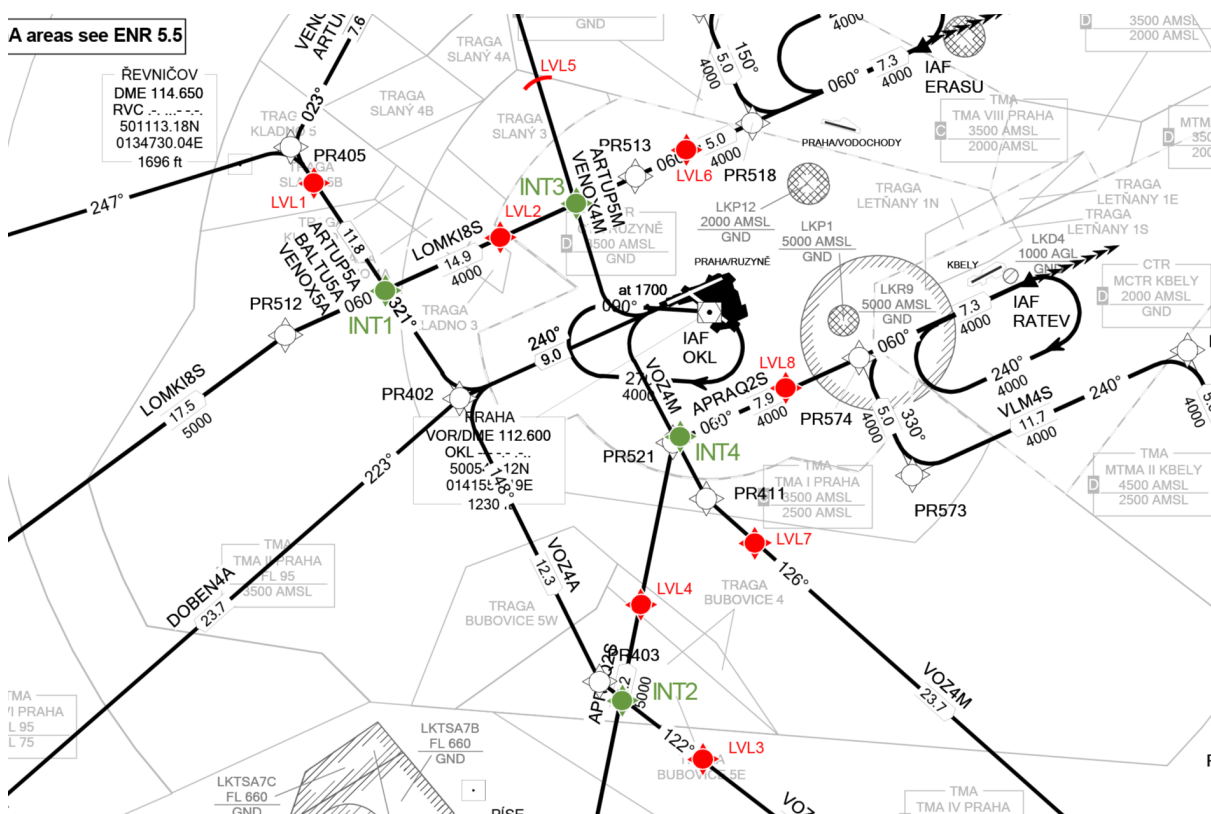
LOMKI8S podle metod popsanych v kapitole 2.2 a vzdálenost tohoto fixu od OKL VOR/DME (i se započtením nepřesností měření DME).

LTP - bod, ve kterém se plocha, začínající 5 m nad DER (5 m + 1202 ft) a zvedající se o PDG (procedure design gradient), protne s nadmořskou výškou 1700 ft s přičtením reakčního času pilota (3 s) a zpoždění náklonu letadla (3 s). Návrhová rychlost (ground speed) je 250 kt. PDG je na těchto odletových tratích 10 % až do nadmořské výšky 3500 ft.

$$\begin{aligned} \text{Vzdálenost LTP od DER} &= \text{PDG} \cdot (\text{výška pro točení} - \text{výška nad DER} - \text{výška DER}) \\ &+ \text{časové zpoždění} \cdot \text{rychlost} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\text{Vzdálenost LTP od DER} = 10 \cdot \left(1700 - \frac{5}{0,3048} - 1202\right) \cdot \frac{0,3048}{1852} + \frac{2 \cdot 3}{3600} \cdot 250 \approx 1,2 \text{ NM}$$

Na výpočet bodu Level 7 (LVL7) na odletové trati VOZ4M měl vliv přidání ochranný prostor zatačky u bodu PR521, musel tedy být umístěn dále, než kdyby se s přidáním ochranným prostorem fly-by zatačky nepočítalo.



Obrázek 3.1: Schematická mapa umístění bodů Intersection (INT - zeleně) a bodů Level (LVL - červeně) na příletových a odletových tratích dráhy 24.

Tabulka 3.2: Body na tratích, zaručující dodržení rozstupu 5 NM od okolního provozu.

Průsečík, pro jaký jsou body vytvořeny	Bod na odletové trati Bod na příletové trati	Souřadnice
Intersection 1 (INT1)	Level 1 (LVL1)	50° 10' 37.95"N 013° 51' 58.11"E
	Level 2 (LVL2)	50° 08' 37.38"N 014° 03' 34.78"E
Intersection 2 (INT2)	Level 3 (LVL3)	49° 47' 24.46"N 014° 17' 43.51"E
	Level 4 (LVL4)	49° 58' 00.50"N 014° 13' 01.44"E
Intersection 3 (INT3)	Level 5 (LVL5)	11,5 NM OKL DME
	Level 6 (LVL6)	50° 13' 12.99"N 014° 18' 53.76"E
Intersection 4 (INT4)	Level 7 (LVL7)	49° 55' 43.03"N 014° 20' 50.94"E
	Level 8 (LVL8)	50° 03' 37.70"N 014° 23' 41.14"E

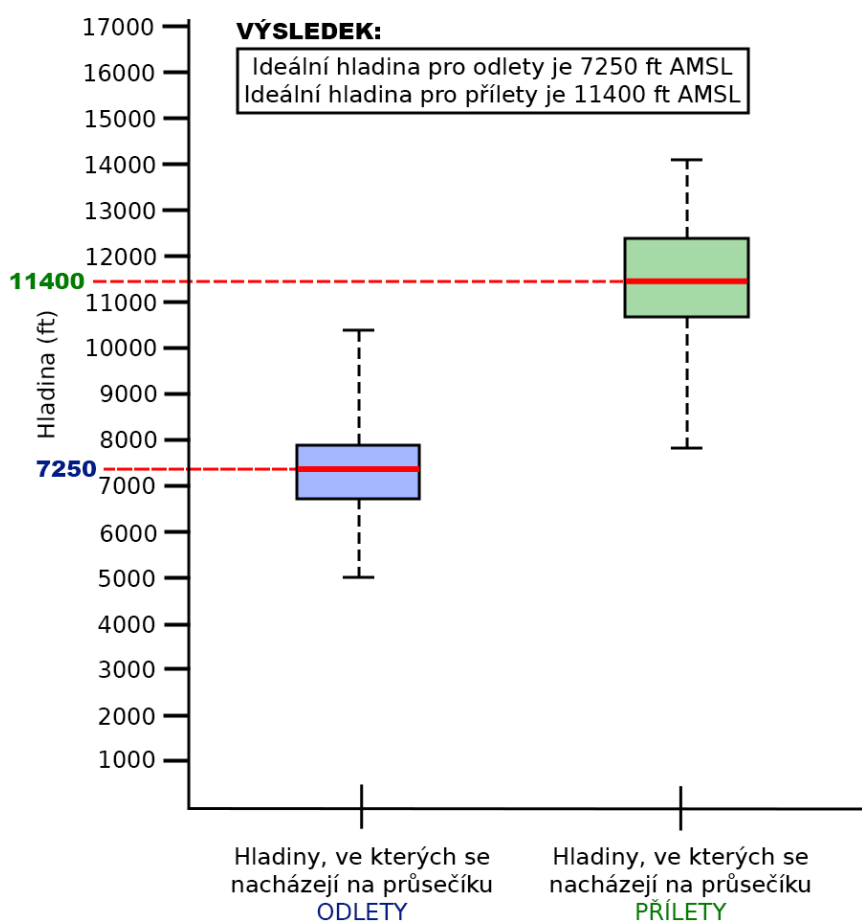
Na závěr došlo ke kontrole již existujících fixů na tratích s novými body nazvanými *Level*. Cílem bylo zamezit nadbytečnému hromadění bodů a minimalizovat tak potenciální chyby v prostorové navigaci, která by mohla mít potíže s výpočtem fly-by zatáček.

Pokud se v blízkosti nově navrhovaného bodu *Level* nacházel stávající fix, došlo k jejich sloučení. Kritériem pro sloučení byla vzdálenost mezi body, která nesměla překročit hodnotu d_{ETP} popsané v rovnici 2.13 z kapitoly 2.2. Přesná hodnota d_{ETP} zohledňuje rychlost zatáčení a letu (TAS) a velikost změny kurzu v daném bodě a pro každý bod se tedy liší.

Level 1 byl sloučen s bodem PR405, protože jejich vzájemná vzdálenost je přibližně 1,62 NM. Level 6 byl sloučen s PR518 (vzájemná vzdálenost necelých 0,33 NM) a Level 8 byl sloučen s PR574 (vzájemná vzdálenost necelých 0,92 NM).

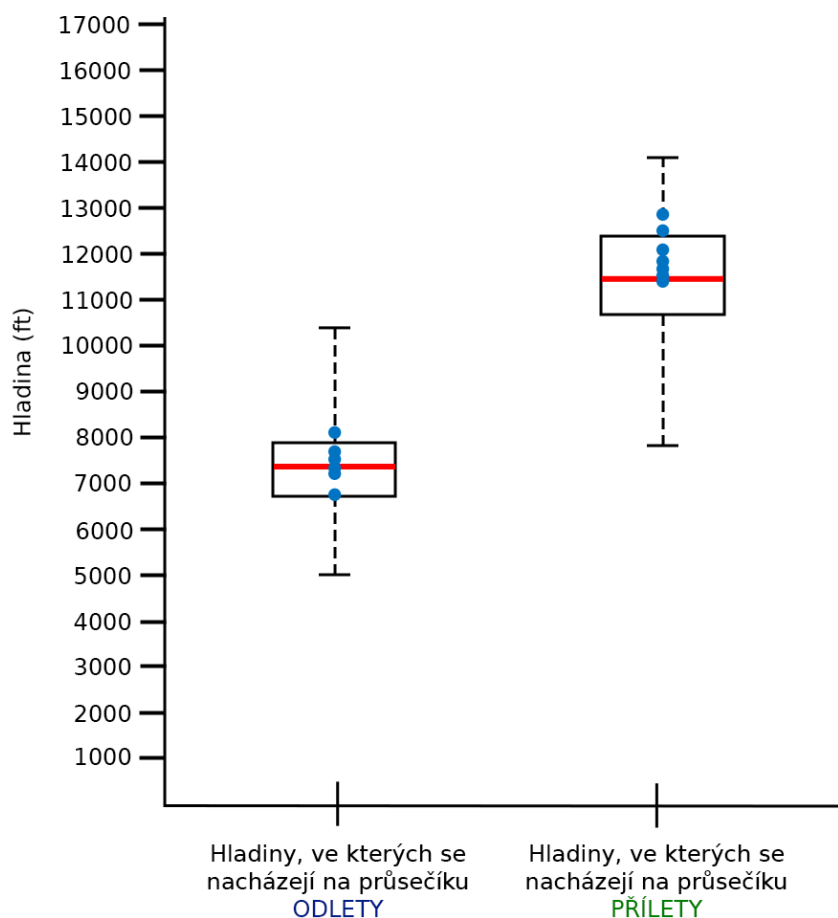
3.2 Vertikální omezení

Tato kapitola shrnuje výsledky analýzy vertikálního profilu příletových a odletových tratí. Pro každý bod Intersection byla určena hladina, ve které se letadla nad průsečíkem nacházejí a jaká poslouží jako jedna z informací pro zavedení vertikálních omezení. Metody pro určení hladiny byly popsány v kapitole 2.3. Zmíněné boxploty získaly formát, který je ilustrován na obrázku 3.2. Červená linka symbolizuje medián dat, černé horizontální linky nad a pod boxploty pak maximum a minimum. Obdélníkové ohraničení znázorňuje, v jakých hladinách se vyskytuje 75 % provozu. Vertikální omezení by se na tomto příkladě (po konzultaci mediánu s dalšími hodnotami, jako např. průměr) stanovilo na $\overline{FL090}$ pro odlety a $\overline{FL100}$ pro přílety.



Obrázek 3.2: Ilustrace boxplotu vertikálního profilu provozu na LKPR. Vlastní ilustrace.

Do boxplotů byly rovněž již přidány hodnoty z databáze BADA takovým způsobem, jaký lze vidět na obrázku 3.3. Modré terčičky znázorňují ideální hladinu pro každý typ letadla podle simulace BADA. Tím je zajištěn co nejpřesnější návrh optimální hladiny a od něj se odvíjející návrh vertikálního omezení na daném bodě.

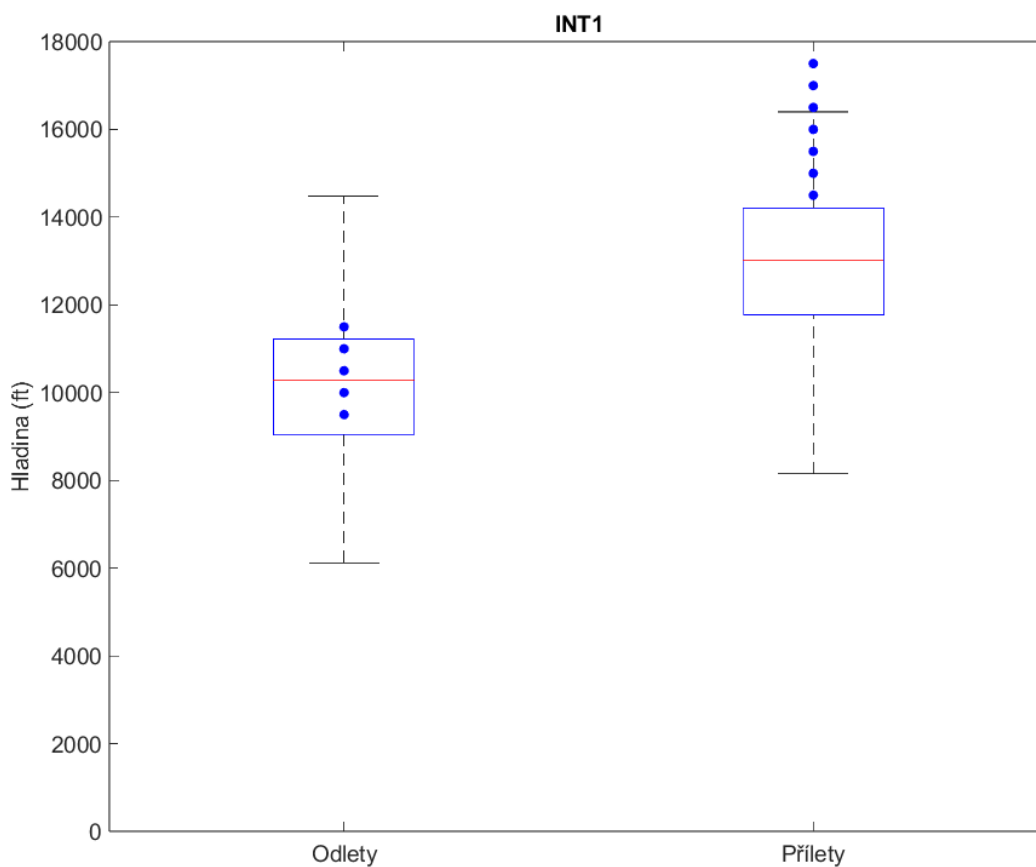


Obrázek 3.3: Ilustrace boxplotu vertikálního profilu provozu na LKPR v porovnání s BADA. Vlastní ilustrace.

Na základě těchto metod byla pro každý bod Level vybrána optimální hladina, která zohledňuje jak nejfrekventovanější hladiny, tak i bezpečnostní a provozní aspekty. Tato hladina byla zapsána do příletové tratě jako pevný limit, který bude budoucí provoz povinen dodržet.

Po určení vertikálních omezení bylo možné přistoupit na vytvoření kompletně nových map přístrojových příletů a odletů. Je důležité myslet na fakt, že letadla nebudou nucena dodržet vertikální omezení, nedostanou-li přímo pokyn od řídicího letového provozu. Tato informace musí být rovněž do mapy přidána.

3.2.1 Intersection 1



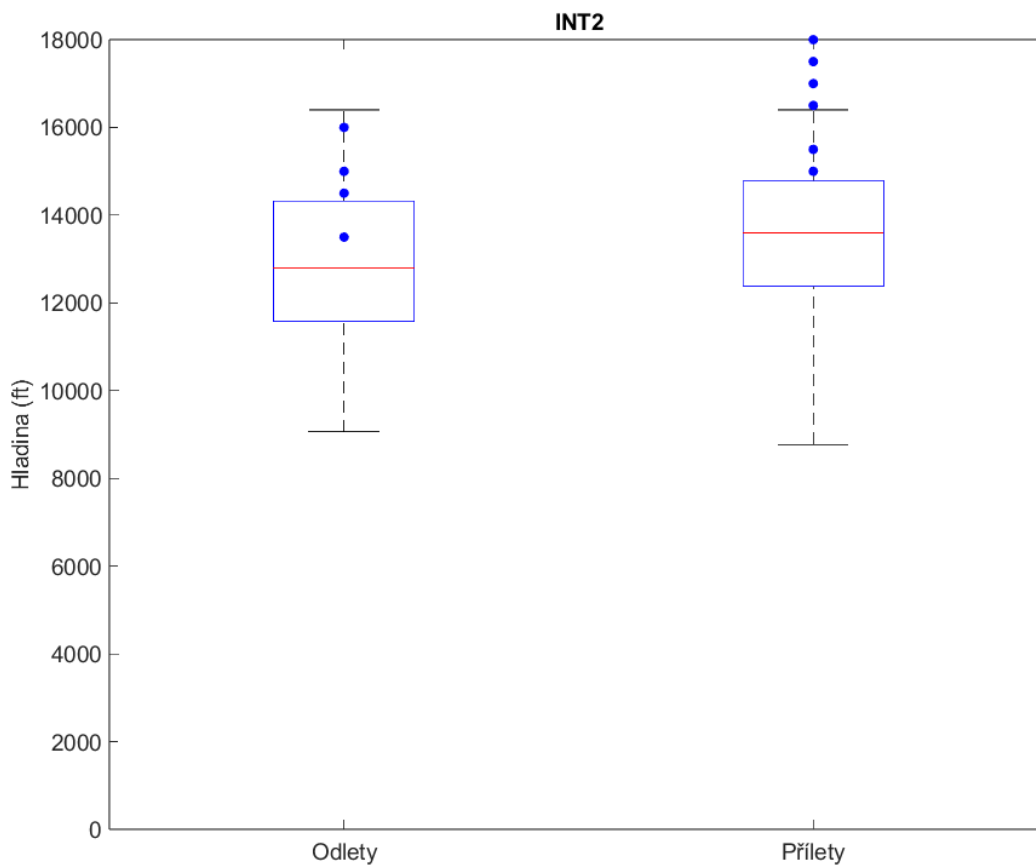
Obrázek 3.4: Boxplot vertikálního profilu na průsečíku Intersection 1 (INT1) s přidanými hodnotami databáze BADA (modře).

Z reálného provozu jsou data následující. U odletů je medián hladiny, ve které se na průsečíku letadla pohybují, 10275 ft a průměr 10394 ft. U příletů je medián 13025 ft a průměr 12803 ft.

Pro bod Level 1 (LVL1), který je limitní pro odlety a byl sloučen s bodem PR405, je navrženo vertikální omezení na letovou hladinu 120 a níže.

Pro bod Level 2 (LVL2), který je limitní pro přílety, je navrženo vertikální omezení na letovou hladinu 130 a výše.

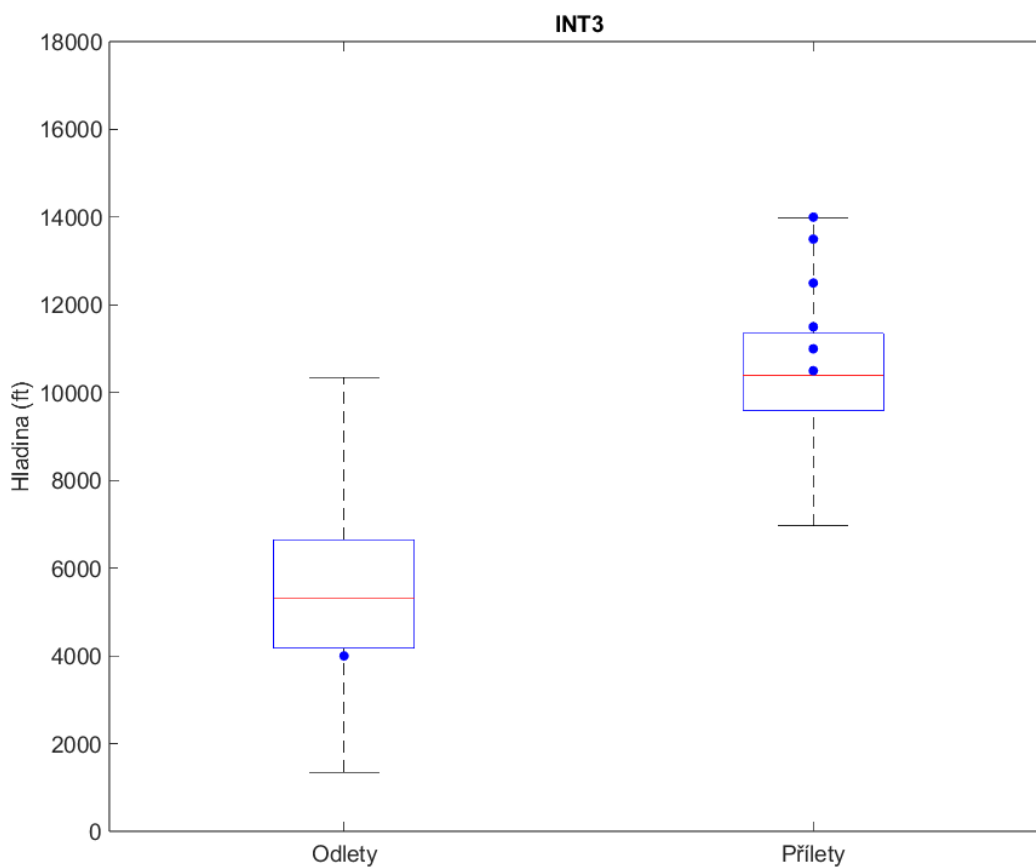
3.2.2 Intersection 2



Obrázek 3.5: Boxplot vertikálního profilu na průsečíku Intersection 2 (INT2) s přidanými hodnotami databáze BADA (modře).

Z reálného provozu jsou data následující. U odletů je medián hladiny, ve které se na průsečíku letadla pohybují, 12800 ft a průměr 13012 ft. U příletů je medián 13600 ft a průměr 13222 ft. Pro bod Level 3 (LVL3) je navrženo vertikální omezení na letovou hladinu 120 a níže. Pro bod Level 4 (LVL4) je navrženo vertikální omezení na letovou hladinu 130 a výše.

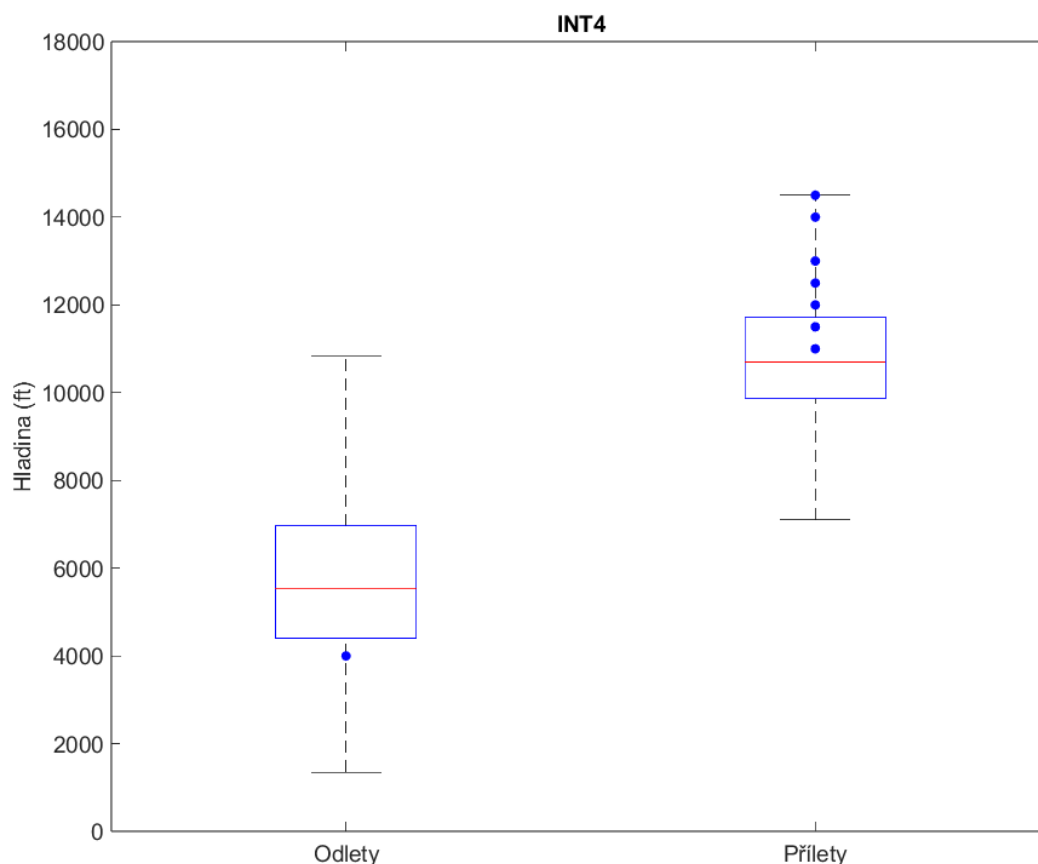
3.2.3 Intersection 3



Obrázek 3.6: Boxplot vertikálního profilu na průsečíku Intersection 3 (INT3) s přidanými hodnotami databáze BADA (modře).

Z reálného provozu jsou data následující. U odletů je medián hladiny, ve které se na průsečíku letadla pohybují, 5325 ft a průměr 5440 ft. U příletů je medián 10400 ft a průměr 10266 ft. Pro bod Level 5 (LVL5) je navrženo vertikální omezení na letovou hladinu 80 a níže. Pro bod Level 6 (LVL6), který byl sloučen s bodem PR518, je navrženo vertikální omezení na letovou hladinu 90 a výše.

3.2.4 Intersection 4



Obrázek 3.7: Boxplot vertikálního profilu na průsečíku Intersection 4 (INT4) s přidanými hodnotami databáze BADA (modře).

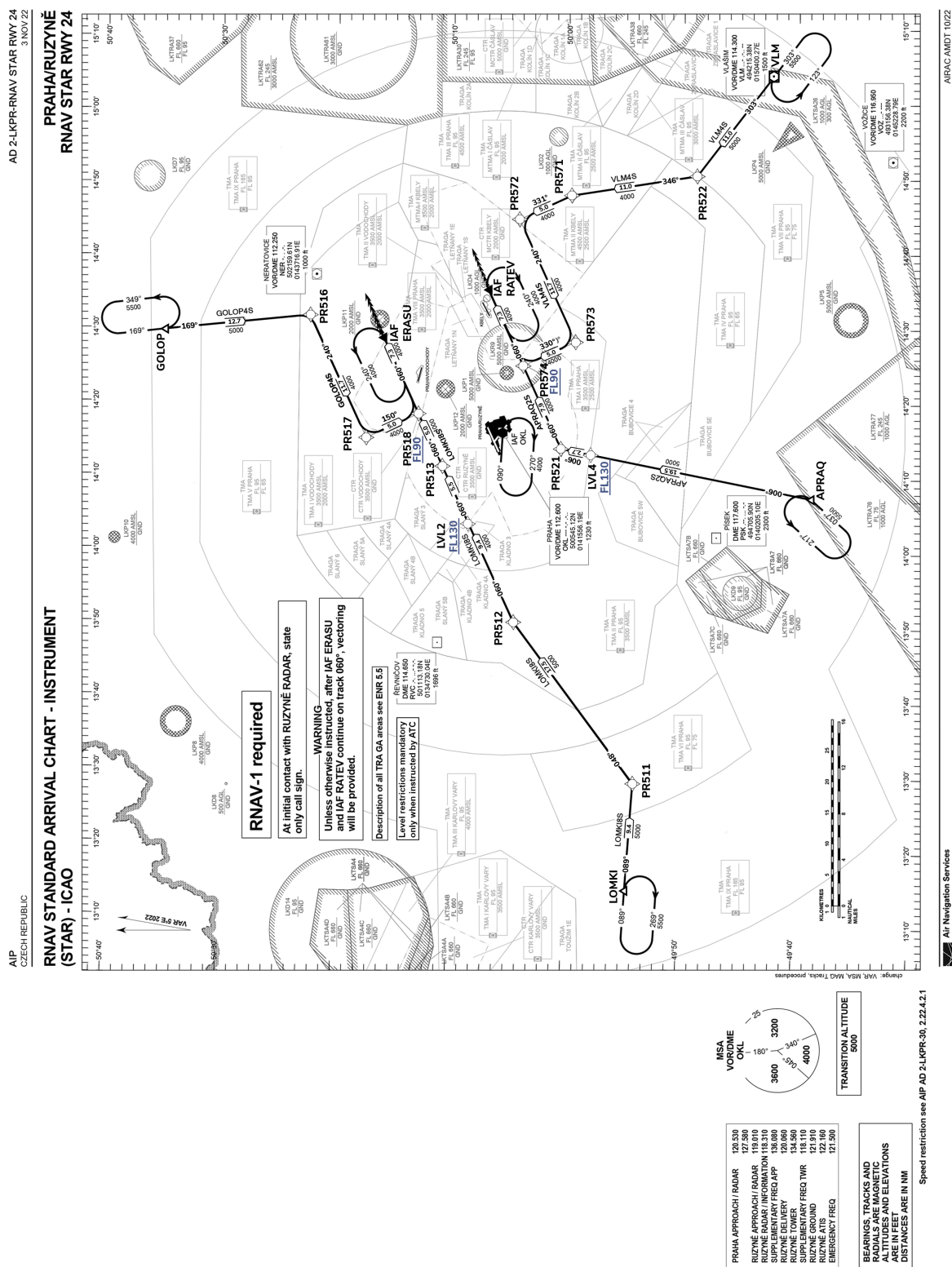
Z reálného provozu jsou data následující. U odletů je medián hladiny, ve které se na průsečíku letadla pohybují, 5525 ft a průměr 5675 ft. U příletů je medián 10700 ft a průměr 10577 ft.

Pro bod Level 7 (LVL5) je navrženo vertikální omezení na letovou hladinu 80 a níže.

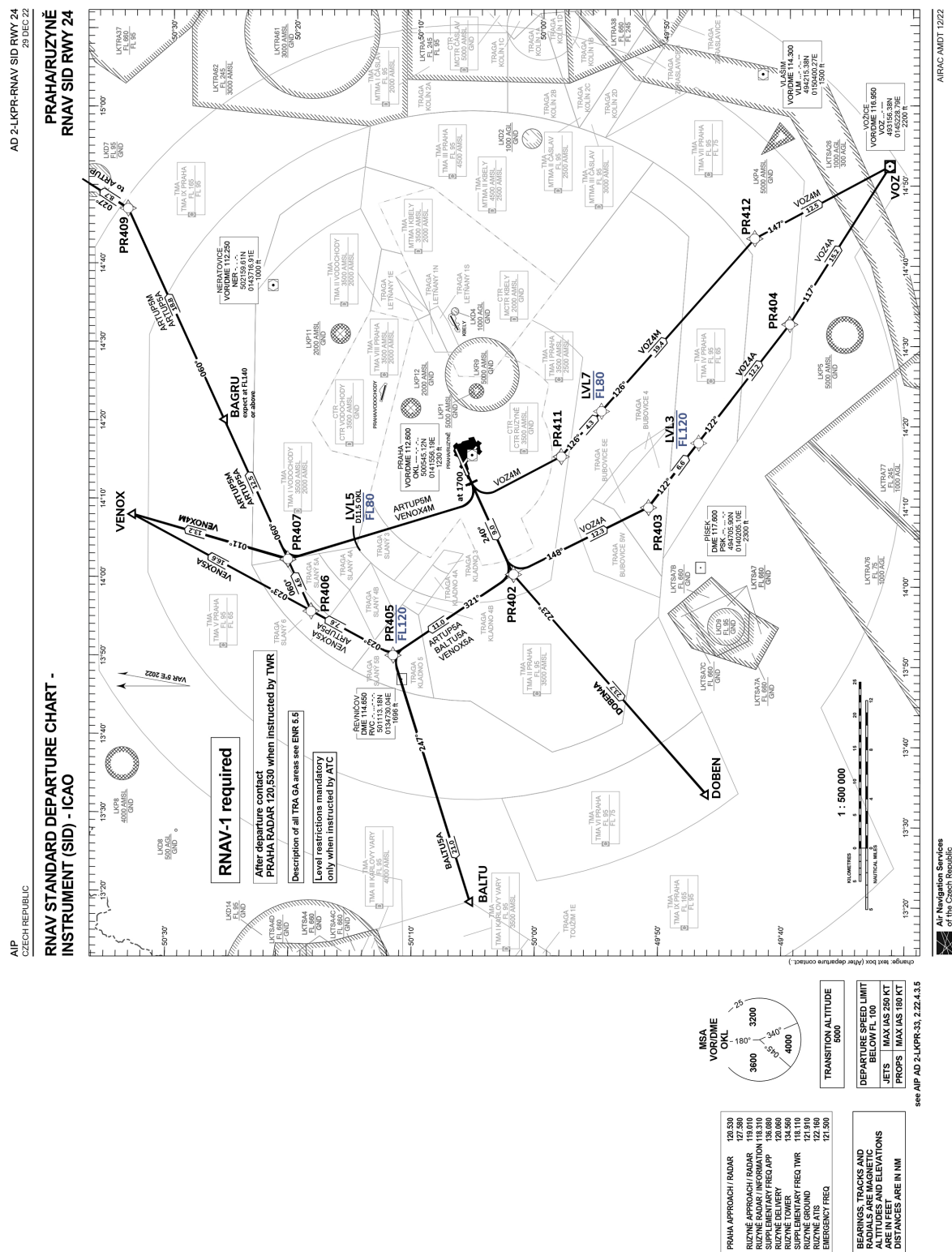
Pro bod Level 8 (LVL8), který byl sloučen s bodem PR574, je navrženo vertikální omezení na letovou hladinu 90 a výše.

3.3 Výsledný návrh

Dle vypočítaných bodů z kapitoly 3.1, ve kterých se budou aplikovat vertikální omezení určeny v kapitole 3.2, byla vytvořena následující *RNAV Mapa standardních přístrojových příletů* a *RNAV Mapa standardních přístrojových odletů* na základě již existujících podkladů v AIP ČR [4].



Obrázek 3.8: Nově navrhovaná mapa standardních přístrojových přiletů na dráhu 24 letiště Praha Ruzyně s vertikálními omezeními.



Obrázek 3.9: Nově navrhovaná mapa standardních přístrojových odletů z dráhy 24 letiště Praha Ruzyně s vertikálními omezeními.

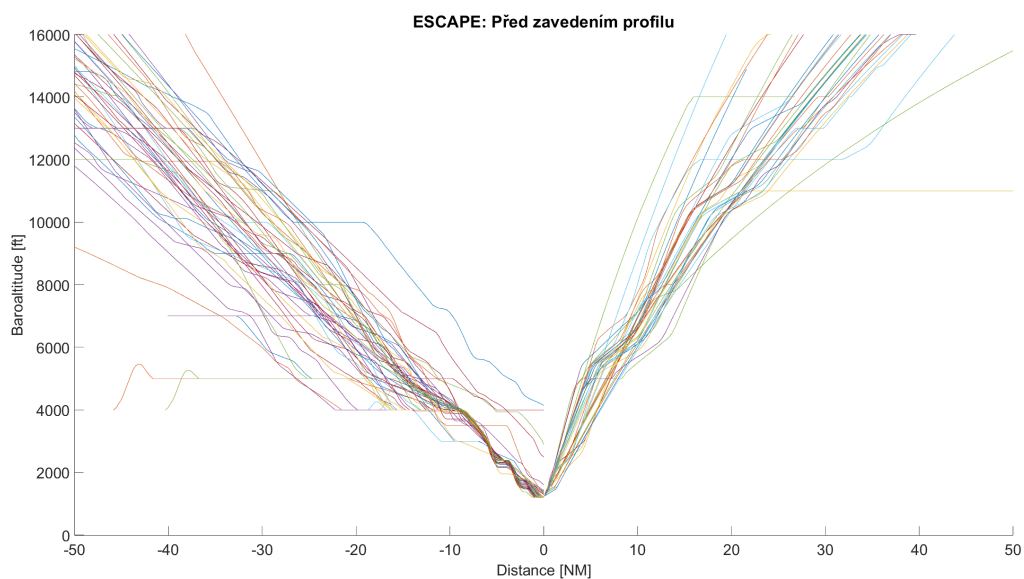


3.4 Simulace v systému ESCAPE

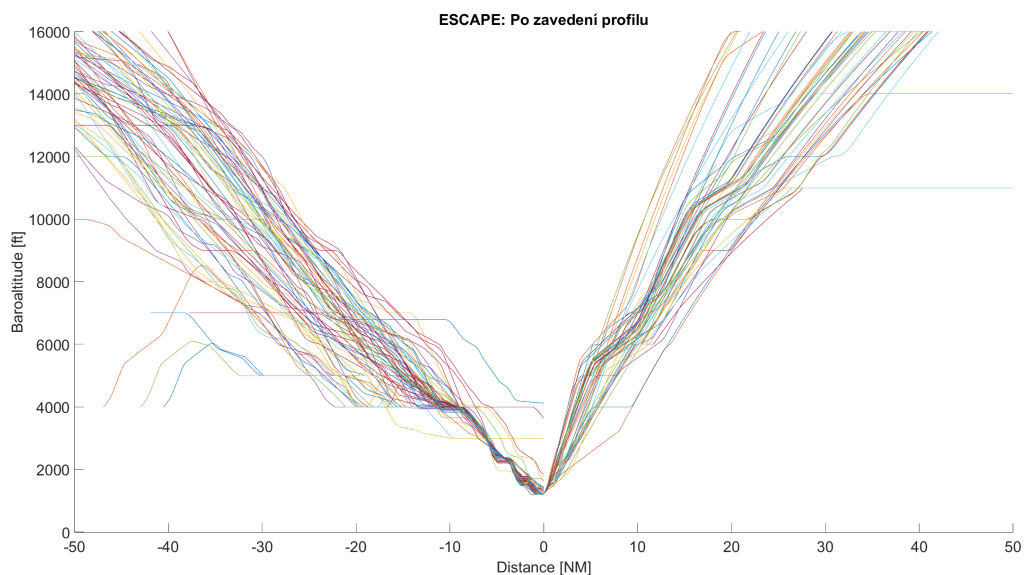
V systému ESCAPE proběhlo celkem pět simulací, přičemž každá z nich trvala přibližně 1 hodinu. Simulovaný provoz, jehož celkový počet dosáhl 45 letadel, byl tvořen výhradně přílety a odlety na LKPR. Ze simulací byly vytvořeny grafy vertikálního profilu obdobné grafu na obrázku 2.5. V grafech je patrný rozdíl před a po zavedení vertikálních limitací zejména v bodě zahájení klesání a jeho strmosti. Po zavedení nových postupů je na obrázku 3.11 vidět, že přilétající letadla zahajují klesání později než dosud (obrázek 3.10). Nacházejí se tedy ve vyšších hladinách a neklesají zpočátku natolik prudce. Letovou hladinu 130 dosáhnou ve většině případů až na bodě, ve kterém se nachází příslušná vertikální limitace (LVL2 a LVL4). Téměř stejně tomu je i v případě druhého omezení vertikální polohy pro letovou hladinu 90, ovšem v menší míře. To je zapříčiněno menším počtem odlétajícího provozu vrtulových letadel, které v LKPR nejsou příliš zastoupena. Vertikální limitace pro FL90 pak nebyla řídicím letového provozu vyžadována a letadlu bylo povoleno klesat bez omezení až do výšky středního přiblížení.

Průměrná spotřeba paliva byla u příletů velmi podobná, občas dokonce mírně vyšší. Až do výšky středního přiblížení 4000 ft činila průměrná spotřeba všech přilétajících letadel 0,282 kg/s před zavedením a 0,286 kg/s po zavedení nových postupů.

Odlety se lišily v závislosti na množství příletů nad nimi prolétajícím. Většinou však stoupaly pod méně strmým úhlem, aby dosáhla bodu s vertikálním omezením v požadované hladině a nemusely zastavit stoupání. Stávalo se tak méně často, že by letadla zastavila stoupání a čekala na dosažení bodu, který umožňuje pokračovat ve stoupání. To mělo za následek celkově nižší průměrnou spotřebu pro všechny odlety, která činila 0,888 kg/s před zavedením a 0,856 kg/s po zavedení nových postupů.



Obrázek 3.10: Grafické zobrazení vertikálního profilu simulovaného provozu přiletů (vlevo na ose x) a odletů (vpravo na ose x) *před zavedením* vertikálního profilu na LKPR (uprostřed). Data ze simulačního prostředí Escape, graf vytvořen v prostředí Matlab.



Obrázek 3.11: Grafické zobrazení vertikálního profilu simulovaného provozu přiletů (vlevo na ose x) a odletů (vpravo na ose x) *po zavedení* vertikálního profilu na LKPR (uprostřed). Data ze simulačního prostředí Escape, graf vytvořen v prostředí Matlab.



3.5 Data z leteckých simulátorů

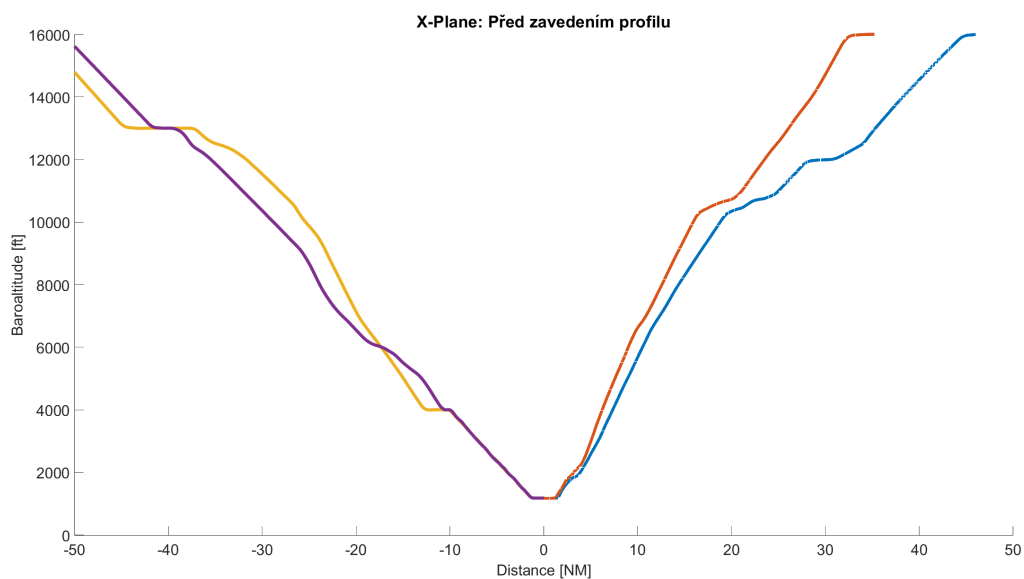
V systému X-Plane bylo provedeno osm simulací na letounu Boeing 737 za účelem porovnání vertikálních profilů a spotřeby paliva před a po zavedení vertikálního profilu. Letadla na přiletu, stejně jako v prostředí ESCAPE, začínají klesání později než před zavedením postupů a pokračují bez zalevelování až do výšky středního přiblížení. Pokud je použit mód autopilota VNAV (Vertical NAVigation) v kombinaci se správně zadanými body do navigačního počítače i s příslušnými vertikálními restrikcemi, letadlo je schopno řídit si rychlost klesání tak, aby dosáhlo bodu v optimální hladině. Tou může být buď hladina totožná s vertikálním omezením, nebo vyšší.

Simulace proběhly s letadly na vyšších hmotnostech, aby se ověřilo, že i taková letadla budou schopna požadovaný profil dodržet a následně sklesat a zabrzdit na přístrojové přiblížení.

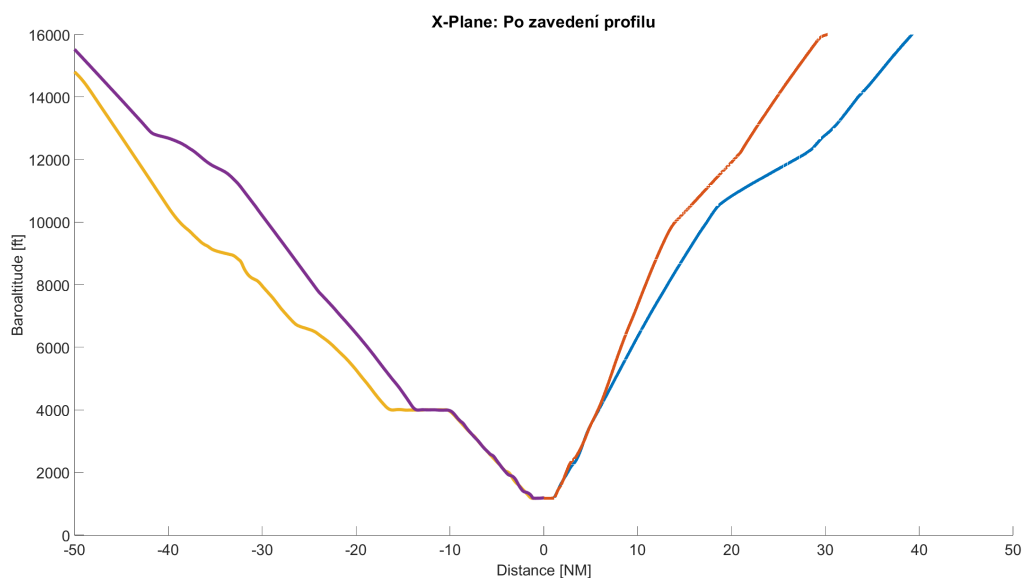
Spotřeba paliva u přilétajících letadel mezi letovou hladinou 160 a nadmořskou výškou 4000 ft (výška středního přiblížení) byla průměrně 0,34 kg/s před zavedením nových postupů a 0,21 kg/s po zavedení nových postupů.

Letadla na odletu nebyla novými postupy téměř vůbec omezena, jelikož se hladina s vertikální restrikcí většinou nacházela nad optimální hladinou. Spotřeba u odlétajících letadel tvořila průměrně 1,30 kg/s před zavedením nových postupů a 1,16 kg/s po zavedení nových postupů.

Simulace na letounech Boeing 737 a Airbus A320 ukázaly, že u letadel s vysokou přistávací hmotností mohlo docházet k mírným obtížím v závěrečné fázi přiletu. Tyto obtíže se projevily prodloužením doby klesání do výšky středního přiblížení a nutností postupného brzdění na rychlost konečného přiblížení. Během tohoto brzdění musely být v jednom případě využity prostředky pro zvýšení odporu (spoilers, speedbreaky), aby byla dodržena limitace 210 kt na fixu počátečního přiblížení dle AIP CZ ENR 1.5.2.2 [4]. Dle provedených měření však nebylo nutné u žádného letadla prodloužit letěnou vzdálenost o více než 5 NM.



Obrázek 3.12: Grafické zobrazení vertikálního profilu simulovaného provozu přiletů (vlevo na ose x) a odletů (vpravo na ose x) letounu Boeing 737-800 *před zavedením* vertikálního profilu na LKPR (uprostřed). Data ze simulačního prostředí X-Plane, graf vytvořen v prostředí Matlab.



Obrázek 3.13: Grafické zobrazení vertikálního profilu simulovaného provozu přiletů (vlevo na ose x) a odletů (vpravo na ose x) letounu Boeing 737-800 *po zavedení* vertikálního profilu na LKPR (uprostřed). Data ze simulačního prostředí X-Plane, graf vytvořen v prostředí Matlab.



4 Diskuze výsledků

Analýza boxplotů stoupání pro odletové tratě naznačuje, že trajektorie letadel v reálném provozu již v současnosti odpovídají optimálnímu výkonnostnímu profilu, který je vypočítán palubním počítačem a udržován automatickým systémem regulace tahu. Toto zjištění koresponduje s očekáváním, jelikož moderní letadla jsou vybavena sofistikovanými systémy optimalizace letu, které automaticky řídí stoupání tak, aby bylo dosaženo maximální efektivity a bezpečnosti a jejich výpočty jsou téměř totožné s matematickými modely BADA.

V případě BADA modelů turbovrtulových letadel procházejících body INT3 a INT4 je patrný rozdíl ve stoupacím gradientu mezi modely a reálným provozem. BADA modely na vysoké hmotnosti nedosahují takového gradientu stoupání, jako letadla v reálném provozu. To se projevuje jako zaostávání modrých bodů BADA pod boxplotem reálného provozu. Důvodem může být více faktorů a to například, že BADA modely nemusí zahrnovat všechny relevantní faktory ovlivňující výkonnost letadla, jako například detailní aerodynamické vlastnosti, specifické nastavení motorů nebo vliv vnějších podmínek. BADA také používá pouze standardizované hodnoty a tím automaticky vzniká odchylka vůči reálnému stavu. Dalším faktorem, který posouvá průměrné hladiny reálného provozu nad ty optimální, je požadavek na vyšší gradient stoupání, a to 10 % až do nadmořské výšky 3500 ft na odletových tratích směrem na sever přes INT3.

Přilétající letadla se v reálném provozu nacházejí mírně níže, než by odpovídalo optimální trajektorii dle BADA. Toto chování lze připsat snaze pilotů o dřívější klesání do nejnižší povolené hladiny, čímž se připravují na postup přístrojového přiblížení, zpomalují letadlo a nastavují konfiguraci pro přistání. Navíc v reálném provozu letadlo málokdy letí celou trať i s kompletní tratí počátečního a středního přiblížení. Velmi časté je vektorování do osy dráhy na postup konečného přiblížení již od momentu, jakmile se letadlo nachází paralelně s přistávací drahou.

Po zavedení vertikálního profilu lze vidět změnu v chování pilotů jak na odletu, tak na přiletu. Odlétající provoz podle simulací stoupá s menší vertikální rychlostí a tuto přebytečnou energii promění v dopřednou rychlost a úsporu paliva. Přilétající provoz na druhou stranu stráví delší dobu ve vyšších hladinách a využije vertikální profil jako vodítko, v jaké hladině by se měl kde nacházet. Tyto hladiny by navíc měly více korespondovat s optimálním profilem daného letadla.

Realističnost simulovaných dat mohla být ovlivněna inherentními limity simulačního prostředí. ESCAPE nemá přístup ke všem parametrům, se kterými piloti v kokpitu běžně pracují. Výpočty jsou závislé na vstupech z pseudopilotní pozice a na parametrech odpovídajících modelům BADA. Pseudopiloti, kteří simulují chování letadel a posádek, jsou



zodpovědní za ovládání všech letadel na spojení s řídícím. To jim omezuje kapacitu pro realistické zohlednění veškerých aspektů situace v letadlech.

Simulátory, ve kterých probíhala měření na letounech B737 a A320, mají také svá omezení. Podobně jako ESCAPE nemohou naprosto totožně kopírovat reálnou situaci v letadlech. Jejich výpočetní modely jsou ale již schopny věrně promítnout fyzikální aspekty atmosféry, ve které se letouny pohybují.

V grafech po implementaci vertikálního profilu (obrázky 3.12 a 3.13) je u příletů patrný úbytek úseků, kdy by letadlo letělo v hladině (se zalevelováním). Prodloužily se úseky, kdy letadlo letělo ve výšce středního přiblížení 4000 ft AMSL. Tato skutečnost byla nejpravděpodobněji dána dvěma faktory. Prvním byla poměrně vysoká hmotnost letadel na příletu, která se pohybovala kolem 65 tun. Druhým faktorem byla nezkušenost testovacích pilotů s novým postupem, která vyústila v upřednostnění klesání před brzděním. Snižování rychlosti letadla pak tedy následovalo až v poslední fázi příletu po doklesání do výšky středního přiblížení. Každopádně i tento způsob klesání dospěl k úspoře paliva, jelikož i během horizontálního letu byl aplikován minimální tah motorů pro snížení rychlosti.

Celkově ze všech provedených simulací byla průměrná spotřeba paliva o 13,2 % nižší po zavedení nových postupů. Největší změnu udávala data ze simulací B738 v prostředí X-Plane, kde byla spotřeba téměř o 25 % nižší než před zavedením profilu. Nejmenší změna se projevila v prostředí ESCAPE, kde to byly pouze jednotky procent a u příletů se dokonce spotřeba mírně zvýšila.

Celkově simulace byly v souladu s očekáváním, jak se bude provoz chovat na příletových a odletových tratích před a po zavedení vertikálního profilu. Mírně větší předpoklad byl v úspoře paliva v prostředí ESCAPE, která nedosahovala takových hodnot, jaké se očekávaly. Na to však může mít vliv mnoho faktorů, jako je přesnost pilotáže pseudopiloty, kontrola klesání a stoupání a schopnosti řídících letového provozu se s provozem vypořádat kontrolovaným a efektivním způsobem. Dalšími atributy, které mohly mít vliv na měření je syntetičnost prostředí ESCAPE, který sice aktivně provádí výpočty na základě integrované BADA databáze, ale je stále jen simulátor. Vychází z konkrétních číselných hodnot, které jsou dány standardními parametry.

Vzhledem k časové náročnosti měření bylo získáno relativně omezené množství dat. Získání rozsáhlejšího souboru dat, ať už v simulačním prostředí, nebo v reálném provozu, by mohlo přinést další cenné poznatky o vertikálním pohybu letadel a jejich spotřebě paliva.

V případě nefunkčnosti VOR/DME OKL použité vertikální limitace nebude možné využívat vertikální limitaci na Level 5 a to z důvodu absence dálkoměrného zařízení klíčového pro určení



11,5 NM OKL DME. Týkalo by se to tratí ARTUP 5M a VENOX 4M, kdy by bylo nutné vrátit se k již existujícímu způsobu letu po trati pouze s horizontálním profilem.

Úspěšná implementace navrhovaných přístrojových příletů a odletů do reálného provozu bude vyžadovat patřičnou instruktáž pro řídicí letového provozu a piloty. Tito klíčoví aktéři budou muset důkladně porozumět principům fungování systému, včetně jeho benefitů a limitací. Nejedná se totiž pouze o novou trať, jde o kompletně nový přístup k organizaci letového provozu.

Společně s těmito novými procedurami byly zavedeny některé dříve neupotřebené fráze z leteckého předpisu L Frazologie [39]. Příkladem jsou "Climb via SID..." nebo "Descend via STAR..." a další s těmito procedurami související. Porozumění těmto novým frázím a jejich významu je klíčové pro jejich správné užití v radiotelefonii. Jedině poté lze dosáhnout vyšší efektivity provozu a menšího počtu komunikací, než kdy dříve [13].

V návaznosti na tuto práci lze dále uvažovat o vytvoření podobného vertikálního profilu pro příletové a odletové tratě zbývajících drah LKPR. Tento krok by poté kompletně pokryl 3D strategickou de-konfliktnost všech tratí na letišti a posunul by jej z pohledu Eurocontrol mezi rozvinutá moderní letiště. Dalším rozvinutím této práce by mohla být aplikace vertikálního profilu na okolní letiště v ČR.



5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout vertikální profil příletových a odletových tratí na dráze 24 letiště Praha Ruzyně. Tím zlepšit a zjednodušit činnosti pilotů a řídicích letového provozu a zároveň tyto dva světy více propojit. Důraz byl kladen odstranění bariér mezi těmito dvěma skupinami a podpora vzájemné spolupráce zejména ve špičkách pracovní zátěže.

V práci byla provedena analýza provozní situace na letišti Praha Ruzyně (LKPR) včetně rozboru příletových a odletových tratí. Byl určen výpočet průsečíků těchto tratí a ochranných prostorů kolem nich. V programovacím jazyce Matlab byla pro tento výpočet vytvořena nová funkce s názvem *intersection*.

Následně proběhla analýza vertikálního profilu již zavedených tratí na základě přístrojových map, dat ze sítě OpenSky a databáze Base of aircraft data (BADA) od Eurocontrol. Podle těchto informací byly vytvořeny boxploty v programovacím jazyce Matlab a určena vertikální omezení tak, aby efektivně pokrývala nejčastější typy letadel na LKPR.

Vertikální omezení byla zapracována do nových map přístrojových příletů a odletů a využita při zakotvení nových postupů do provozu letadel přilétajících a odlétajících na LKPR. Proběhly simulace na simulačních platformách ESCAPE od Eurocontrol, X-Plane a Prepar3D a byly vyhodnoceny změny v porovnání se současným stavem.

Ačkoliv konkrétní hodnoty ušetřeného paliva při použití nových metod se liší, ve výsledku lze říci, že tento systém je výhodnější z pohledu pracovní zátěže leteckých posádek i z pohledu konzumace paliva. Průměrná hodnota spotřeby se pohybuje kolem 87 % hodnoty před zavedením vertikálního profilu.

Vertikální profil podporuje přístup Eurocontrol ke konstrukci PBN tratí dnešní doby. Díky propojení řízení letového provozu s leteckými posádkami dostanou obě strany příležitosti dosud nepoznané. Zjednoduší se jejich práce, sníží se spotřeba paliva a zátěž na motorech a uvolní se prostor na frekvenci. Letiště Praha se tak posune mezi moderní letiště 21. století.



Seznam použité literatury

1. *Letecký předpis L2: Pravidla létání*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2014. Dostupné také z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-2/index.htm>.
2. *Letecký předpis L8168: Provoz letadel - letové postupy*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2019. Dostupné také z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-8168i/index.htm>.
3. *Letecký předpis L11: Letové provozní služby*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2000. Dostupné také z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-11/index.htm>.
4. *Aeronautical Information Publication (Letecká informační příručka)*. Česká republika: Letecká informační služba, 2024. Dostupné také z: https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/control/aip_obsah_cz.htm.
5. *European Airspace Concept Handbook for PBN Implementation: PBN HANDBOOK No. 1*. 4. vydání. Eurocontrol, 2021.
6. *Doc 9613: Performance-based Navigation (PBN) Manual*. Sv. 5. Mezinárodní organizace pro civilní letectví, 2023. Dostupné také z: <https://pbnportal.eu/epbn/barPages/Library.html>.
7. *Letecký předpis L4444: Postupy pro letové navigační služby - Uspořádání letového provozu*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2011. Dostupné také z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/index.htm>.
8. *Doc 8168 (Procedures for Air Navigation Services): Aircraft Operations, Volume II Construction of Visual and Instrument Flight Procedures*. Sv. 5. Mezinárodní organizace pro civilní letectví, 2006.
9. *Introduction to Jeppesen navigation charts*. 2012. Dostupné také z: <https://ww2.jeppesen.com/wp-content/uploads/2019/05/Introduction-to-Jeppesen-Navigation-Charts.pdf>.
10. GÖKER, Ümit Deniz; BALCI, Gökhan; KÖKSAL, Özge; ŞENGELEN, Hakan Eren et al. The statistical analysis of air crash investigations from 1918 to 2019. *Savunma Bilimleri Dergisi*. 2021, roč. 2, č. 40, s. 1–32.
11. COWAN, Tom; ACAR, Erdem; FRANCOLIN, Camila. Analysis of causes and statistics of commercial jet plane accidents between 1983 and 2003. *Mechanical and Aerospace Engineering Department University of Florida*. 2006.



12. *European PBN Route Spacing Handbook: PBN HANDBOOK No. 3*. 1. vydání. Eurocontrol, 2021.
13. FIALA, Jan. *Návrh implementace vertikálního profilu příletových a odletových tratí na LKPR*. Praha, 2024.
14. ROBINSON III, John; KAMGARPOUR, Maryam. Benefits of Continuous Descent Operations in High-Density Terminal Airspace Considering Scheduling Constraints. In: *10th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. ISBN 978-1-62410-159-5. Dostupné z DOI: 10.2514/6.2010-9115.
15. ROSENOW, Judith; FÖRSTER, Stanley; FRICKE, Hartmut. Continuous climb operations with minimum fuel burn. *Sixth SESAR Innovation days*. 2016. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/313755641_Continuous_Climb_Operations_with_Minimum_Fuel_Burn.
16. BRAIN, David; BASTIN, Marylin. *Destination Green: The Next Chapter - 2019 Environmental Report: The Benefits Of CCO / CDO Operations – European Task Force Findings*. 1. vydání. 2019. Dostupné také z: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2019.aspx>.
17. TORATANI, Daichi. *Study on Simultaneous Optimization Method for Trajectory and Sequence of Air Traffic Management*. 2016. Dostupné z DOI: 10.13140/RG.2.2.27308.46727. Dis. pr. Yokohama National University.
18. YE, Bojia; WANG, Zhaohui; TIAN, Yong; WAN, Lili. Aircraft-specific trajectory optimization of continuous descent approach for fuel savings. In: *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*. 2017, s. 751–756. Dostupné z DOI: 10.1109/SII.2017.8279312.
19. NIKOLERIS, Tasos; CHATTERJI, Gano B; COPPENBARGER, Richard A. Comparison of fuel consumption of descent trajectories under arrival metering. *Journal of Aircraft*. 2016, roč. 53, č. 6, s. 1853–1864.
20. *Aeronautical Information Publication (Letecká informační příručka)*. Velká Británie: UK Aeronautical Information Service, 2024. Dostupné také z: <https://www.aurora.nats.co.uk/htmlAIP/Publications/2024-03-21-AIRAC/html/index-en-GB.html>.
21. *Aeronautical Information Publication (Letecká informační příručka)*. Francie: Service de l'Information Aéronautique, 2024. Dostupné také z: <https://www.sia.aviation->



- civile.gouv.fr/dvd/eAIP_21_MAR_2024/FRANCE/AIRAC-2024-03-21/html/index-fr-FR.html.
22. *Aisview* 3.9. 2024. Dostupné také z: <https://aisview.rlp.cz/>.
 23. *RNAV Mapa standardních přístrojových odletů - ICAO RWY 24*. 12. vydání. Praha: Řízení letového provozu České republiky, 2022. Dostupné také z: https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/a2-pr-sid24n.pdf.
 24. JANOVSKEÝ, Tomáš. *Návrh změny standardní příletové tratě na LKPR v TMA Praha*. Praha, 2023. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10467/111279>.
 25. GREENBERG, John L. Isaac Newton and the problem of the earth's shape. *Archive for History of Exact Sciences*. 1996, roč. 49, č. 4, s. 371–391. ISSN 0003-9519. Dostupné z DOI: 10.1007/BF00374704.
 26. SLATER, James A.; MALYS, Stephen. WGS 84 - Past, Present and Future. In: BRUNNER, Fritz K. (ed.). *Advances in Positioning and Reference Frames*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998, s. 1–7. ISBN 978-3-662-03714-0.
 27. *Doc 9674: World Geodetic System - 1984 (WGS-84) Manual*. Sv. 2. Mezinárodní organizace pro civilní letectví, 2002.
 28. *Spherical Trigonometry Related to Distance Computation*. 2001. Dostupné také z: <http://www.boeing-727.com/Data/fly%20odds/distance.html>.
 29. KŘEMEN, Tomáš. *Úvod do vyšší geodézie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2023. Dostupné také z: https://k154.fsv.cvut.cz/~kremen/p%F8edn%E1%9Aka_X_GUI2.pdf.
 30. *Geographic coordinate conversion*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2023. Dostupné také z: https://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_coordinate_conversion.
 31. *LETECKÝ PŘEDPIS L 15: O letecké informační službě*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2007. Dostupné také z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-15/index.htm>.
 32. VINCENY, Thaddeus. Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with Application of Nested Equations. *Survey Review*. 1975, roč. 23, č. 176, s. 88–93. ISSN 0039-6265. Dostupné z DOI: 10.1179/sre.1975.23.176.88.
 33. VINCENY, Thaddeus. *Geodetic inverse solution between antipodal points*. Zenodo, 1975. Dostupné z DOI: 10.5281/zenodo.32999.



34. SCHÄFER, Matthias; STROHMEIER, Martin; LENDERS, Vincent; MARTINOVIC, Ivan; WILHELM, Matthias. Bringing Up OpenSky: A Large-scale ADS-B Sensor Network for Research. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*. Berlín, 2014. IPSN '14. Dostupné z DOI: 10.1109/IPSNS.2014.6846743.
35. LIDICKÝ, Filip. *Využití tažných vozidel a autonomních systémů pro pojíždění letadel*. Praha, 2022. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/103773>.
36. *Doc 8643: Aircraft Type Designators*. Mezinárodní organizace pro civilní letectví, 1963. Dostupné také z: <https://www.icao.int/publications/DOC8643/Pages/default.aspx>.
37. ČEVELA, Adam. *Instruktorská příručka simulátoru Airbus A320*. Praha, 2019. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/85328>.
38. *CS-FSTD(A): Aeroplane Flight Simulation Training Devices*. 2. vydání. Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví, 2018. Dostupné také z: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/cs-fstda-issue-2>.
39. *Předpis L Frazologie*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2022. Dostupné také z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-Frazeologie/index.htm>.