



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

Fakulta dopravní  
Ústav letecké dopravy

**Návrh systému pro detekci laserového útoku na přistávající letadlo**  
**Design of a system for detection of laser attack during final approach**

**Diplomová práce**

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Provoz a řízení letecké dopravy

Vedoucí práce: doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.

---

**Bc. Tomáš Kříž**

Praha 2023



**K621.....Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Tomáš Kříž**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

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

Název tématu (česky): **Návrh systému pro detekci laserového útoku na přistávající letadlo**

Název tématu (anglicky): Design of a System for Detection of Laser Attack during Approach

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je navrhnout systém využívající bezpilotního prostředku k detekci útočníka s laserovým paprskem v úseku přiblížení. Součástí bude zhodnocení legislativních požadavků, technické podmínky pro detekci a návrh vhodné trajektorie.
- Možnosti detekce laserových paprsků.
- Možnosti provozu UAS v blízkosti řízeného letiště.
- Geometrie polohy pro detekci zdroje laserového záření.
- Analýza prostoru v blízkosti řízeného letiště vzhledem k bezpečnému provozu UAS.
- Zhodnocení proveditelnosti návrhu.



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ICAO DOC 8168 - Provoz letadel - letové postupy  
Lasery a moderní optika - Miroslava Vrbová  
Nařízení EK 664/2021- o regulačním rámci pro vzdušný prostor U-space

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Hospodka, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2022**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

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

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



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

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Tomáš Kříž  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 16. května 2023



## Abstrakt

Ozařování letadel laserovými svazky nabývá v posledních letech na intenzitě. Boj s tímto nebezpečným fenoménem je velmi nesnadný, v současné době limitovaný na vyhledávání pachatele pomocí vrtulníků bezpečnostních složek. Jejich posádkám však hrozí stejné nebezpečí jako posádkám ostatních letadel - oslnění, dočasná ztráta zraku či orientace a snížení schopnosti bezpečně pilotovat letadlo. Tato práce přináší alternativní přístup k tomuto problému v podobě bezpilotního systému, který může vykonat stejnou práci jako posádka vrtulníku, avšak s menšími riziky a za zlomek ceny. Bepilotní letadlo lze provozovat i v blízkosti letišť, tedy tam, kde k incidentům s lasery dochází nejčastěji. Jsou zde představeny konkrétní letové scénáře, které lze pro tyto detekční lety použít. Byla také identifikována omezení, na která tato práce naráží a pro která byla navržena eliminující opatření. Výstupy zde prezentované jsou obecně aplikovatelné, při použití v zahraničí je však nutno vzít v úvahu místní legislativu. Výsledkem je závěr, že detekce laserových svazků, vyskytujících se v okolí letišť, pomocí bezpilotních systémů, ač mající své limity, je možná a za určitých podmínek proveditelná i za současného stavu legislativy a technologického pokroku.

**Klíčová slova:** bezpilotní systém, laser, oslnění



## **Abstract**

Irradiation of aircraft with laser beams has been gaining momentum in recent years. The fight against this dangerous phenomenon is very difficult, currently limited to the search for the perpetrator by helicopters of the security forces. Their crews, however, face the same dangers as the crews of other aircraft - glare, temporary loss of vision or orientation, and reduced ability to safely pilot the aircraft. This paper presents an alternative approach to this problem in the form of an unmanned system that can perform the same task as a helicopter, but with fewer risks and at a fraction of the cost. The unmanned aircraft can also be operated near airports, where laser incidents occur most frequently. Specific flight scenarios usable for these detection flights are presented. The limitations encountered in this work have also been identified and elimination measures have been proposed for these limitations. The findings presented here are generally applicable, but local legislation must be taken into consideration when used for abroad operations. As a result, it is concluded that the detection of laser activity, occurring in the vicinity of airports, utilizing unmanned aerial systems, although having its limitations, is possible and, under certain conditions, feasible even under the current state of legislation and technological advances.

**Keywords:** bedazzlement, laser, unmanned aerial system



## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří se zasloužili o vznik této práce, jmenovitě panu docentu Hospodkovi za trpělivé a odborné vedení, dále panu Schmidtovi, panu docentu Krausovi, panu inženýrovi Kleczatskému, paní inženýrce Guskové a paní inženýrce Pilmannové z Ústavu letecké dopravy a panu plukovníkovi Vlasákovi a panu podplukovníkovi inženýru Nathovi z Letecké služby Policie ČR za odbornou pomoc a praktické rady. Největší poděkování, za dlouhodobou podporu a zázemí, však patří mé rodině a nejbližším přátelům, bez nichž by tato práce nemohla vzniknout.

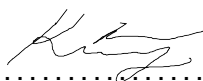


## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Návrh systému pro detekci laserového útoku na přistávající letadlo vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

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

V Praze dne 30. listopadu 2023

.....  


*Podpis*



## Obsah

<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>1 Teoretické základy práce</b>	<b>14</b>
1.1 Přehled současného stavu . . . . .	14
1.2 Limitace současného stavu . . . . .	17
1.3 Shrnutí . . . . .	18
<b>2 Metody</b>	<b>19</b>
2.1 Obecný popis průběhu detekční mise . . . . .	19
2.2 Oblast provozu detekčního bezpilotního systému v okolí letiště . . . . .	19
2.3 Možnosti letu v CTR - legislativa, koordinace . . . . .	23
2.3.1 Provoz bez koordinace . . . . .	23
2.3.2 Předem koordinovaný a schválený provoz uvnitř CTR podle pravidel VLOS . . . . .	26
2.3.3 Předem koordinovaný a schválený provoz uvnitř CTR podle pravidel BVLOS . . . . .	28
2.3.4 Let pro zajištění plnění úkolu Policie ČR . . . . .	29
2.3.5 Vznik dedikovaného vzdušného prostoru . . . . .	30
2.3.6 Shrnutí . . . . .	30
2.4 Vhodné bezpilotní letadlo . . . . .	31
2.5 Detekce laserového svazku – kamera a zpracování obrazu . . . . .	33
2.6 Lokalizace útočníka . . . . .	35
<b>3 Prezentace výsledků</b>	<b>37</b>
3.1 Geometrie zásahu letadla laserovým svazkem . . . . .	37
3.1.1 Útok vedený z prodloužené osy dráhy . . . . .	38
3.1.2 Útok vedený ze směru kolmého na podélnou osu letadla . . . . .	41
3.2 Experimenty s detekcí . . . . .	44
3.3 Konzultace s odborníkem na ATM . . . . .	44
3.4 Databáze několika letových scénářů v závislosti na poloze útočníka . . . . .	47
3.4.1 Přiblížení na přistání na RWY 24 – zdroj záření severně od trati . . . . .	52
3.4.2 Přiblížení na přistání na RWY 24 – zdroj záření jižně od trati . . . . .	54
3.5 Konzultace s LS PČR . . . . .	56
3.6 Konzultace s odborníkem na bezpilotní prostředky . . . . .	58
3.7 Simulace navrhovaného provozu na ATC simulátoru . . . . .	59





<b>4</b>	<b>Diskuze výsledků</b>	<b>63</b>
4.1	Identifikované limitace a jejich eliminace . . . . .	64
4.2	Validace výsledků . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>70</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>71</b>



## Seznam obrázků

1.1	Počet letů mezi roky 2004 - 2021 s predikcí do roku 2023 . . . . .	14
1.2	Statistika počtu laserových útoků proti letadlům na území USA . . . . .	15
1.3	Počty barev laserových svazků použitých pro útoky proti letadlům v ČR . . . . .	16
2.1	Heat mapa s místy, ve kterých byl ohlášen laserový útok na letadlo . . . . .	20
2.2	Mapa zobrazující jednotlivé útoky v okolí Prahy . . . . .	21
2.3	Schéma detekce laserového svazku . . . . .	22
2.4	Podoba gridu v okolí LKPR . . . . .	24
2.5	Situace vyhledávání útočnicka - okótované vzdálenosti a výšky . . . . .	25
2.6	Automatický hangár DJI Dock . . . . .	33
2.7	DJI Matrice M350 s kamerou H20 . . . . .	33
2.8	DJI Matrice M30 . . . . .	34
3.1	Výhled z kabiny letounu Airbus A320 směrem dopředu . . . . .	38
3.2	Výhled z kabiny letounu A320 ve směru kolmém k podélné ose letadla . . . . .	38
3.3	Výhled z kabiny letounu A320 ve vodorovné rovině od podélné osy letadla . . . . .	39
3.4	Slepý úhel a minimální vzdálenost útočnicka při čelním útoku na letadlo na úrovni FAF . . . . .	40
3.5	Bezpečné a nebezpečné zóny při čelním zásahu letadla na pozici FAF . . . . .	41
3.6	Bezpečné a nebezpečné zóny při čelním zásahu letadla 4 NM od prahu dráhy . . . . .	42
3.7	Bezpečný koridor při útoku ze strany . . . . .	43
3.8	Snímek pořízený kamerou bezpilotního letadla při přímém zásahu laserovým svazkem . . . . .	45
3.9	Viditelný zdroj i svazek laserového záření . . . . .	45
3.10	Viditelný zdroj při větší vzdálenosti snímače od laserového svazku . . . . .	46
3.11	Viditelný svazek se zdrojem mimo střed zorného pole snímače . . . . .	46
3.12	Parametry detekčního letu v první fázi - se změnou výšky letu . . . . .	50
3.13	Pohled na vertikální trajektorii bezpilotního letadla . . . . .	50
3.14	Parametry detekčního letu ve druhé fázi - v konstantní výšce . . . . .	52
3.15	Základní trajektorie letu severozápadně od osy dráhy . . . . .	53
3.16	Zkrácená trajektorie letu severozápadně od osy dráhy . . . . .	54
3.17	Základní trajektorie letu jihovýchodně od osy dráhy . . . . .	55
3.18	Zkrácená trajektorie letu jihovýchodně od osy dráhy . . . . .	56
3.19	Výřez obrazovka přehledového systému ze simulace ATC postupů . . . . .	61



## Seznam tabulek

3.1	Rozhledové poměry z kokpitů některých typů letadel [28], [29], [30] . . . . .	38
4.1	Tabulka limitací navrhovaného provozu a jejich možných eliminací . . . . .	65



## Seznam symbolů a zkratk

ADS-B	Automatic dependent surveillance - broadcast
AGL	Výška nad terénem (Above ground level)
AMSL	Výška nad střední hladinou moře (Above mean sea level)
API	Application programming interface
ARC	Třída rizika ve vzduchu (Air risk class)
ATCO	Řídicí letového provozu (Air traffic controller)
ATM	Air traffic management
ATS	Letové provozní služby (Air traffic services)
BVLOS	Mimo přímý dohled pilota (Beyond visual line of sight)
CMOS	Complementary metal–oxide–semiconductor
CTR	Řízený okresek (Control zone)
ČR	Česká Republika
ČVUT	České vysoké učení technické
EASA	Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví (European union aviation safety agency)
ECCAIRS	Evropské koordinační centrum systému hlášení událostí v leteckém provozu (European co-ordination center for accident and incident reporting system)
FAA	Federální letecká správa (Federal aviation administration)
FAF	Fix konečného přiblížení (Final approach fix)
FAP	Bod konečného přiblížení (Final approach point)
GNSS	Globální navigační satelitní systém (Global navigation satellite system)
GRC	Třída rizika na zemi (Ground risk class)
IAF	Fix počátečního přiblížení (Initial approach fix)
ICAO	Mezinárodní organizace pro civilní letectví (International civil aviation organisation)
IF	Fix středního přiblížení (Intermediate fix)
IFR	Pravidla pro let podle přístrojů (Instrument flight rules)
ILS	Instrument landing system
IZS	Integrovaný záchranný systém
KM	Kilometr
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation
LKPR	Letiště Václava Havla Praha
LS PČR	Letecká služba Policie České republiky
M	Metr
MPIX	Megapixel



mW	miliwatt
NM	Námořní míle (Nautical mile)
NSF	Nestandardní let (Non-standard flight)
OkP	Oprávnění k provozu
PČR	Policie České republiky
QRH	Quick reference handbook
RGB	Red, green, blue
RWY	Dráha (Runway)
ŘLP	Řízení letového provozu
SAIL	Specifická úroveň integrity a zabezpečení (Specific Assurance Integrity Level)
SAR	Služba pátrání a záchran (Search and rescue service)
SORA	Specific operations risk assessment
SSR	Sekundární přehledový radar (Secondary surveillance radar)
TCAS	Traffic collision avoidance system
UA	Bezpilotní letadlo (Unmanned aircraft)
UAS	Bezpilotní systém (Unmanned aerial system)
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
UNOB	Univerzita obrany
USA	Spojené Státy Americké
VFR	Pravidla pro let za viditelnosti (Visual flight rules)
VLOS	Přímý dohled pilota (Visual line of sight)
VUT	Vysoké učení technické



## Úvod

S rozvojem vědy a techniky v posledních letech dochází k výraznému zvýšení dostupnosti technologií a zařízení, která bylo dříve velmi obtížné obstarat. Dnes se však staly běžnou součástí občanského života a jsou jednoduše dosažitelné pro širokou veřejnost. Jednou z takových technologií je zdroj laserového záření, který lze běžně opatřit jako laserové ukazovátko či hračku pro vytváření světelných efektů. S rozšířením této technologie však došlo také k nárůstu jejího zneužití [1].

V oblasti letectví se stále častěji setkáváme s laserovým svazkem namířeným na letadla na zemi i ve vzduchu, na řídicí věže i letištní mechanizované prostředky. Piloti, řidiči, pracovníci řízení letového provozu a další osoby zasažené tímto intenzivním světlem mohou následně trpět krátkodobým zhoršením nebo ztrátou zraku, což jim neumožňuje bezpečně vykonávat své povolání [2]. Výzkumu způsobů ochrany letectví před nízkenergetickými lasery se věnuje projekt APALER označený číslem CK03000036 - program DOPRAVA, vypsáný Technologickou Agenturou ČR. V rámci projektu APALER bude, mimo jiné, zkoumána možnost použít bezpilotní systém k detekci pozice útočníka. Předpokladem je využití bezpilotního letadla v blízkosti letiště.

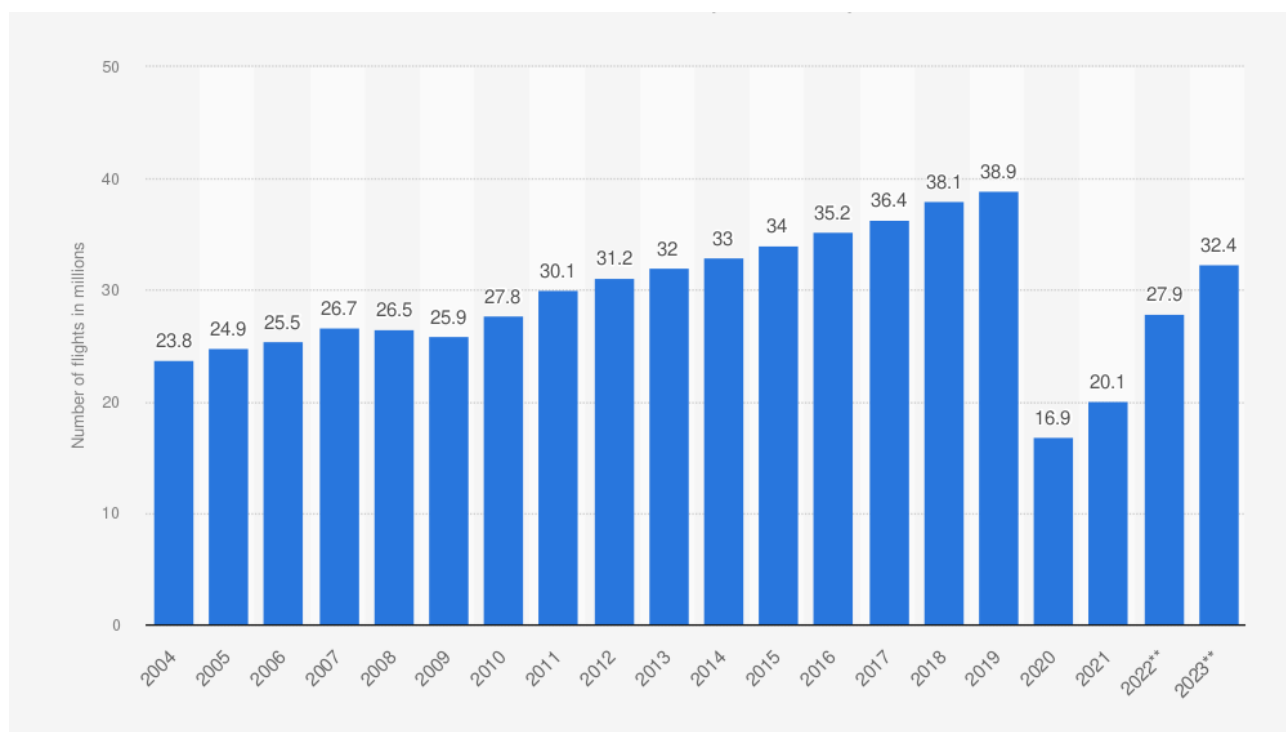
Tato práce se věnuje jedné skupině výše popsaných incidentů, kdy je laserovým svazkem zasaženo letící letadlo ve fázi konečného přiblížení na přistání. Událost ozáření letícího letadla je označována jako útok, neboť se jedná především o úmyslné ozařování, které ohrožuje bezpečnost letecké dopravy [2]. Cílem tohoto textu je analyzovat možnosti a navrhnout takové parametry provozu bezpilotního systému s takovým hardwarovým a softwarovým vybavením a podle takových letových parametrů, aby mohl být tento systém použit k usnadnění lokalizace zdroje laserového záření. Proti takto zaměřenému zdroji může být následně efektivně zakročeno, což v konečném důsledku minimalizuje dopad laserové činnosti na bezpečnost letového provozu v dané oblasti.

# 1 Teoretické základy práce

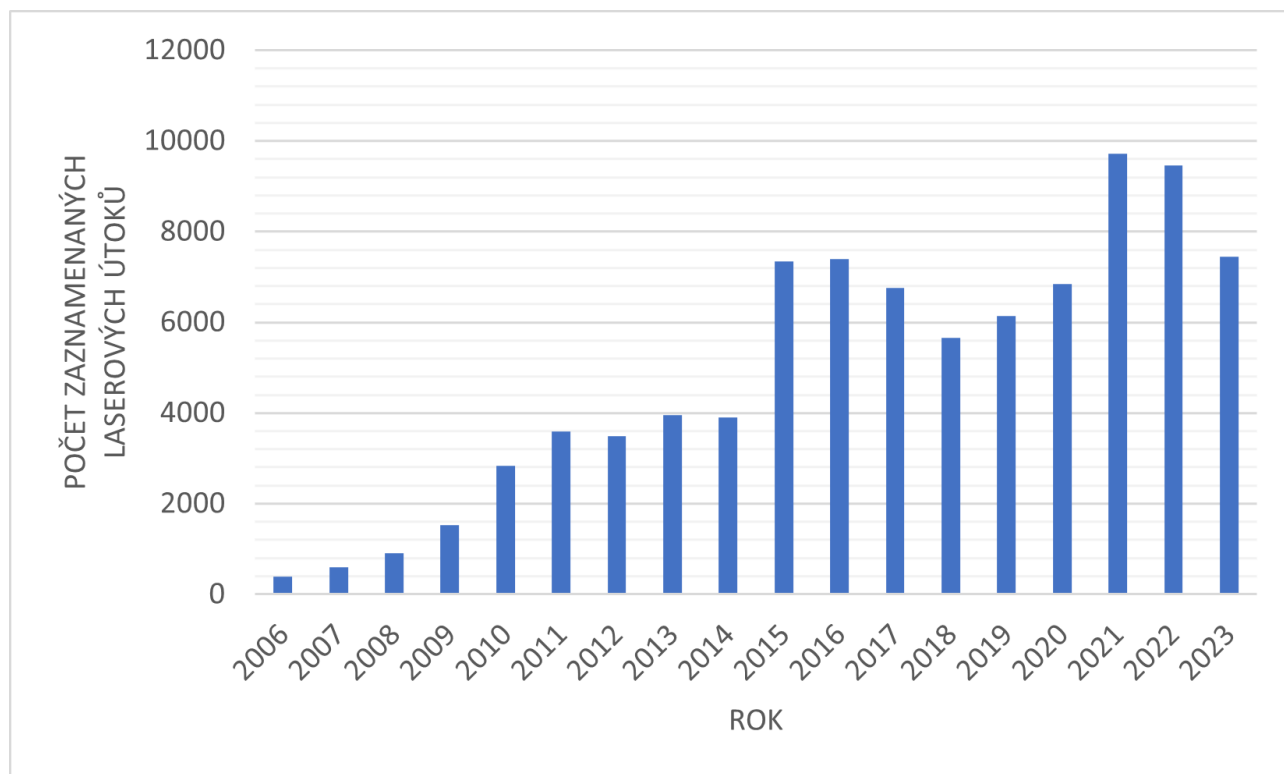
## 1.1 Přehled současného stavu

Množství uskutečněných komerčních letů se dlouhodobě zvyšuje, a i navzdory dočasným omezením zavedeným v reakci na pandemii SARS-CoV-2 sledujeme dlouhodobě rostoucí trend jak v nabízené kapacitě, tak v poptávce po přepravě cestujících i nákladu. Tento vývoj od roku 2004 do roku 2021 je znázorněn na obrázku 1.1 a doplňují jej predikce pro roky 2022 a 2023. Se stejným vzestupným trendem však letecké prostředí zaznamenává také počet laserových svazků namířených na letadla v různých fázích letu [3], což je dobře patrné například ze statistiky těchto incidentů v USA vyobrazené na obrázku 1.2. Navzdory vysokým počtům takovýchto útoků nebyla v jejich souvislosti dosud zaznamenána žádná letecká nehoda.

Analýza celosvětového stavu této problematiky je nesnadná, globální data totiž nejsou dobře dostupná z důvodu využívání rozdílných systémů pro hlášení incidentů v letectví na národní úrovni. Informace ze Spojených Států Amerických jsou však dobře dostupné a díky jedinému federálnímu orgánu shromažďujícímu tato data, Federal Aviation Administration (FAA), se dají považovat za jednotná. Množství zde uskutečněných letů je navíc dostatečně vysoké, aby se dalo předpokládat, že podobné trendy reflektují nebo se alespoň přibližují vývoji tohoto trendu i v globálním měřítku.



Obrázek 1.1: Grafické znázornění meziročního vývoje počtu letů v letech 2004 - 2021 s predikcí do roku 2023 (v milionech) [4].



Obrázek 1.2: Statistika počtu laserových útoků proti letadlům na území USA (rok 2023 do 31. 8.) [5].

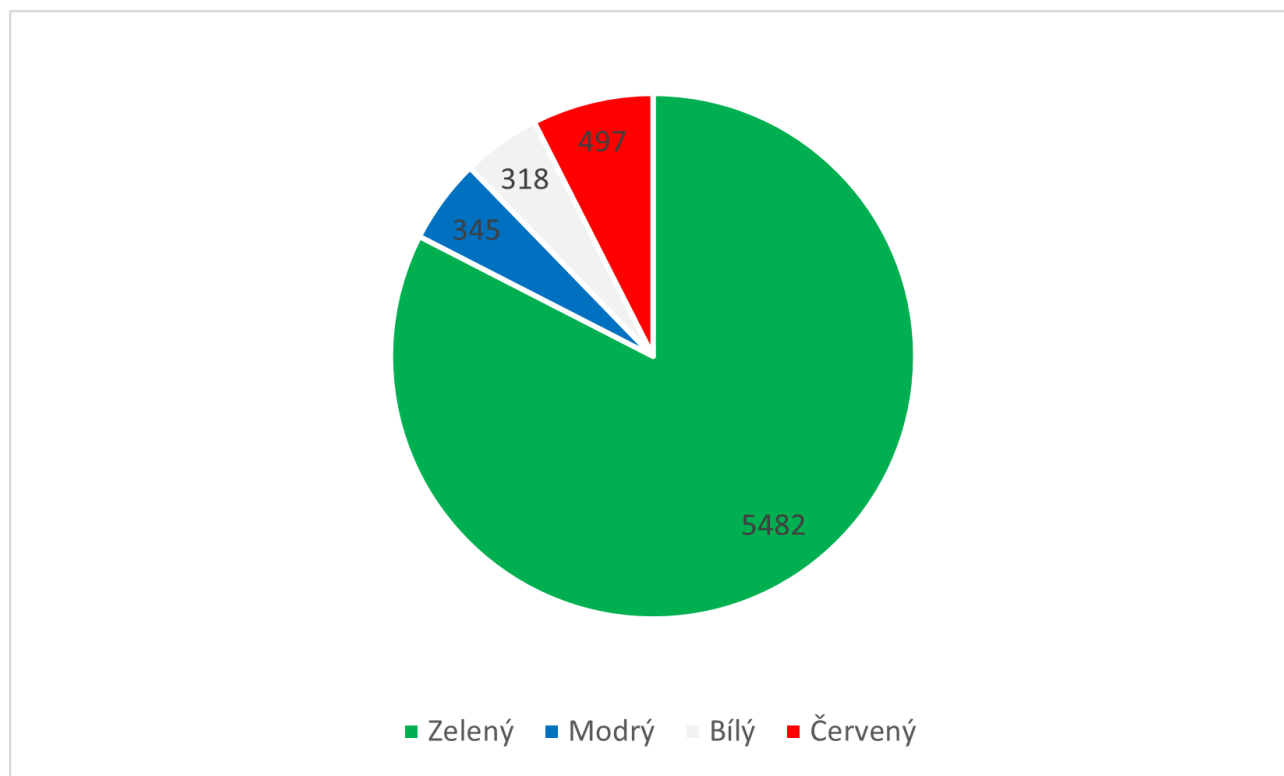
Zástupci letectví, v Evropě sdružovaní Agenturou Evropské unie pro bezpečnost letectví (EASA), se snaží tyto informace centralizovat do Evropského koordinačního centra pro systém hlášení událostí v leteckém provozu – ECCAIRS [6]. Tato databáze slouží ke sběru, sdílení a analýze informací souvisejících s bezpečností v letectví [7].

Autor má přístup k záznamům z této databáze týkajícím se laserových útoků v letech 2016 – 2022. Tyto záznamy neobsahují vždy potřebné informace. Důvodem může být absence jednotných požadavků na vkládané informace nebo rozdílné národní předpisy pro hlášení incidentů místní letecké autoritě, od které jsou data následně získávána pro systém ECCAIRS. U některých záznamů chybí informace například o barvě laserového svazku či výšce letu v okamžiku zásahu, jindy jsou jednotlivé informace přiřazeny do nesprávných kategorií. Například informace o výšce letu lze často najít v textovém popisu události, ačkoli je k tomu určen samostatný sloupec [8].

Z dat, která byla k dispozici a obsahovala potřebné informace, vyplývá, že většina laserových útoků proti letadlům v ČR, konkrétně 82,5 %, je prováděna laserem zelené barvy (obrázek 1.3) [8]. Tuto skutečnost potvrzují i další zdroje, některé z nich uvádějí zastoupení tohoto typu laseru ve více než devadesáti procentech případů [2], [5], [9]. Informace o dalších parametrech jednotlivých incidentů zanesených do systému ECCAIRS nejsou jednotně vyplněny napříč záznamy, jejich analýza by tudíž



byla velmi obtížná.



Obrázek 1.3: Počty zastoupení jednotlivých barev laserových svazků použitých pro útoky proti letadlům v ČR [8].

Pro podrobnější zpracování informací o laserových útocích vychází autor především z americké databáze incidentů vedené Ministerstvem dopravy Spojených Států Amerických, které je nadřazeným orgánem pro Federální leteckou správu – (FAA), zmiňovanou výše. Vzhledem k rozsáhlosti letecké dopravy v USA, kterou spravuje tento jediný orgán, jsou data v americké obdobě ECCAIRS mnohem více uniformní a snadněji zpracovatelná. Pro potřeby této práce jde tedy o vhodný zdroj statistických informací o incidentech.

Data z této databáze mimo jiné také potvrzují, že útočníci si nejčastěji vybírají laserové svazky zelené barvy. V roce 2022 to bylo ve více než osmdesáti procentech případů [5]. Nepříliš překvapující je informace o denní době jednotlivých událostí – většina se odehrává mezi půlnocí a čtvrtou hodinou ranní [1]. Jiné zdroje, neomezující se pouze na oblast Spojených Států uvádějí čas mezi sedmou a jedenáctou hodinou večerní [10]. V obou případech se však jedná převážně o noční hodiny, kdy vzrůstá viditelnost laserového svazku v kontrastu s tmavým pozadím noční oblohy. To má však za následek intenzivnější negativní dopad na zasažené členy posádky, jejichž zrak je přivyknutý nízké intenzitě okolního světla. Oči jsou tedy více citlivé na světlo, což umožňuje vidět za šera, případně i ve tmě. Pokud je však oko přivyknuté na tmu náhle vystaveno intenzivnímu světlu, například laserovému



svazku, může dojít k oslnění, vzniku následných obrazů v zorném poli, případně i k dočasné ztrátě zraku [9], [10].

Z pohledu fáze letu jsou laserové útoky zaznamenány nejčastěji ve fázích přiblížení na přistání a přistání, dále následované fází vzletu [2], [10], [8]. Jinými slovy jde o části letu prováděné v nízkých výškách – převážně do 10 000 stop nad střední hladinou moře. Zaznamenané jsou však i případy zásahu letadla letícího v letové hladině 400 a vyšší [1]. Takováto událost však představuje podstatně nižší riziko, neboť čím delší vzdálenost vzduchem laserový svazek urazí, tím více se rozptyluje na částicích v atmosféře. To spolu s rozbíhavostí svazku znamená nižší světelnou energii dopadající na jednotku plochy u vzdálených objektů.

Motivací útočníků k takovému jednání může být vícero. Nutno však zmínit, že zde se jedná pouze o předpoklady autora, neboť ověřené informace pro tento odstavec nemá k dispozici. Prvním velkým činitelem vysvětlujícím nárůst počtu osob ozařujících letadla laserovým svazkem může být nedostatečná informovanost v kombinaci s dobrou dostupností zdrojů laserového záření pro širokou veřejnost. Občan si nemusí být vědom škodlivosti svého jednání a vlivu, který může mít na posádku letadla. Zákony velké části států tuto problematiku sice pokrývají, ne každý občan je s nimi však dostatečně obeznámen. Příkladně může jít o nevhodný způsob trávení volného času dětí a mládeže. Další příčinou může být pokus o projevení nespokojenosti s leteckou dopravou. Například obyvatelé měst, obcí a městských částí, které jsou zatěžovány negativními dopady nízko přelétávajících letadel se takto mohou snažit poukázat na svou nespokojenost a snažit se ke svému problému přitáhnout pozornost. Také nevhodně provozované zábavné světelné show či průmyslové stroje mohou způsobit dopad laserového svazku do prostoru kokpitu letadla. Zde však může jít o nehodu či selhání techniky, ne pouze o úmyslný čin jako v prvních dvou případech. Pro nalezení efektivního řešení problému je nutné znát především jeho primární příčinu a zde byly popsány některé z těch možných.

## 1.2 Limitace současného stavu

V dnešní době probíhají snahy o omezení laserových útoků na letadla několika způsoby. Legislativně je tato aktivita zakázána a považována za nebezpečnou. Občané páchající takovou činnost mohou být v ČR stíháni za spáchání trestného činu obecného ohrožení podle § 272 zákona č. 40/2009 Sb., trestní zákoník [11]. Z pohledu leteckých zákonů existují v Česku ochranná pásma se zákazem laserových zařízení s vyšším než povoleným výkonem v určitých vzdálenostech od letišť [12]. Aktivní zabraňování laserovým incidentům je velmi omezené. V případě letiště Václava Havla v Praze, na které se tato práce zaměřuje, a provoz na něj přilétající, případně z něj odlétající, se proti laserové aktivitě zasahuje pomocí vrtulníků s posádkou na palubě provozovaných Leteckou službou Policie



České republiky.

Takovéto lety jsou zpravidla reakcí na hlášení některé letové posádky o zaznamenání laserové aktivity. Toto hlášení předává posádka řídicímu letového provozu (ATCO). Jednou z jeho činností je informování Inspektorátu cizinecké policie o této události. Ten může následně zorganizovat vzlet policejního vrtulníku za účelem pátrání po laserové aktivitě. Vrtulník se pohybuje v blízkosti sestupové roviny, na které se běžně nacházejí letadla ve fázi letu, během které byl útok hlášen. Pokud by se opakoval, posádka se bude snažit co nejpřesněji zaznamenat místo, odkud svazek přicházel a na toto místo následně navádět pozemní jednotky, případně, pokud to prostředí dovoluje, provést přistání a pachatele nebo podezřelého na místě zadržet.

Problémem může být zasažení očí laserovým svazkem, který se posádka vrtulníku snaží nalézt. Hrozí zde totiž stejné nebezpečí oslnění jako ostatním posádkám letadel. Další limitací tohoto řešení je využívání LS PČR pro celou řadu jiných zásahů v rámci IZS Hlavního města Prahy, Středočeského kraje a případně i pro složky IZS z jiných krajů. Vzhledem k velkému rozsahu prací, velikosti obsluhovaného území a jeho hustotě zalidnění je vytížení tohoto stanoviště poměrně vysoké. Je tedy možné, že vyhledávání laserové aktivity bude přerušeno například příkazem k vykonání letu pro záchranu života, který má vyšší prioritu. Posádka, vrtulník nebo obojí tedy nemusejí být vždy k dispozici, čímž může dojít k opakování laserových útoků stejným útočником, což v důsledku zvyšuje nebezpečí pro letecký provoz.

### **1.3 Shrnutí**

Technologický vývoj vede beze sporu ke zvýšení bezpečnosti v mnoha odvětvích, letecký průmysl nevyjímaje. Spolu s ním však přicházejí také nové hrozby, kterým je třeba čelit. Jednou z nich je i ozařování letadel laserovými svazky. Ač zatím nebylo laserové záření příčinou žádné závažné letecké události, jeho nebezpečnost nepomíjí, naopak s narůstající intenzitou těchto incidentů stále narůstá i míra nebezpečí. Je tedy na místě zabývat se možnostmi ochrany letectví před tímto druhem hrozby. K tomu má svým dílem přispět i tato práce.



## 2 Metody

Systém navrhovaný v této práci má za cíl využít bezpilotního prostředku jako nosiče optického snímače, který dokáže zobrazit, případně zaznamenat přítomnost laserového svazku a na základě informací o poloze a orientaci snímače v prostoru umožnit co nejpřesnější určení polohy zdroje laserového záření. Tato informace má přispět ke zvýšení bezpečnosti letového provozu v jedné z kritických fází letu.

### 2.1 Obecný popis průběhu detekční mise

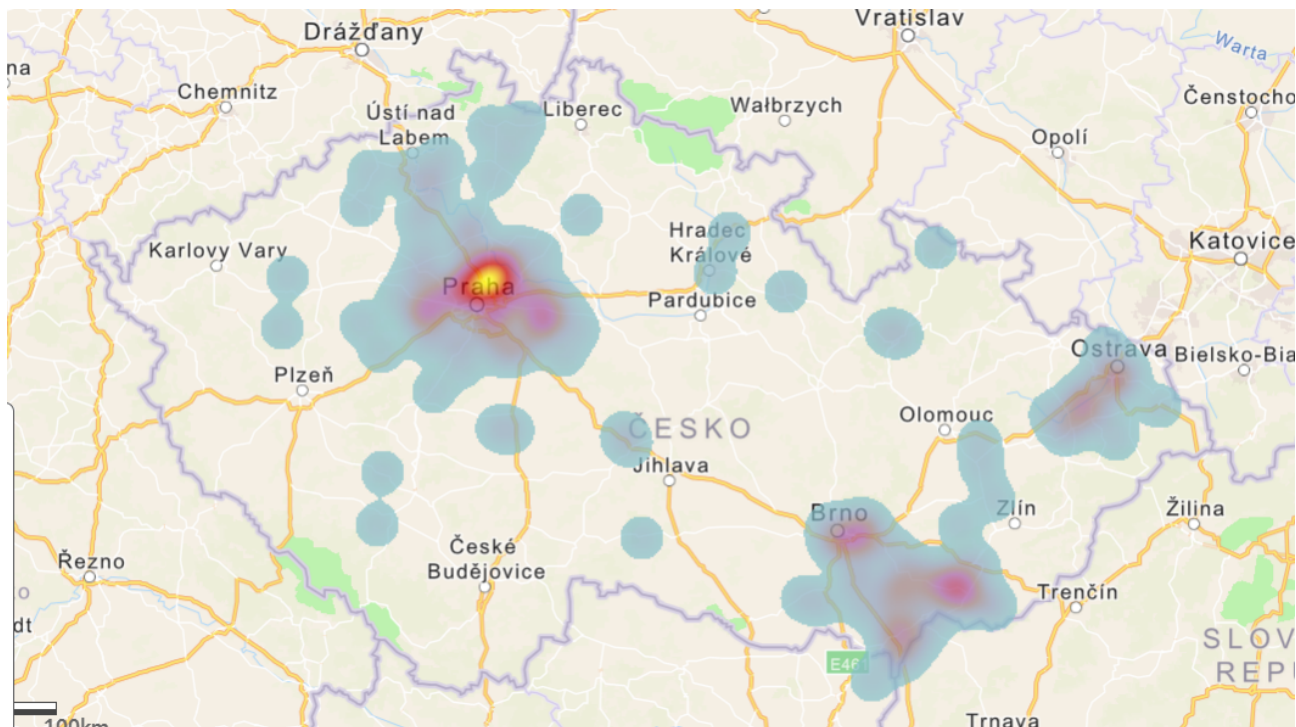
Celá mise za účelem lokalizace útočnicka s laserovým svazkem začne v okamžiku, kdy provozovatel tohoto detekčního systému (například LS PČR) obdrží hlášení od ŘLP o laserové aktivitě v okolí letiště. Tato informace bude pocházet s největší pravděpodobností od letové posádky, která byla tímto laserovým zářením ovlivněna nebo jej zpozorovala. V tu chvíli operátor zvolí některý z předpřipravených scénářů, navržených dále v této práci, odpovídající oblasti, ze které byl útok hlášen. Trajektorie letu bezpilotního letadla bude do stroje nahrána před začátkem letu, což umožní jeho automatický pohyb. Operátor se tedy může soustředit na vyhledávání samotného laserového svazku nebo jeho zdroje z obrazových dat přenášovaných živě na obrazovku ovladače, případně na externí monitor pro větší velikost zobrazení. Kdykoliv v průběhu mise bude mít možnost automaticky let pozastavit nebo zrušit a převzít nad strojem kontrolu. To se standardně využije především pokud bude zpozorován možný zdroj záření a bude potřeba ověřit, nejedná-li se o jiný světelný zdroj. Pokud dojde k pozitivní lokalizaci polohy útočnicka, operátor z dat poskytnutých bezpilotním systémem získá polohové souřadnice, které může předat například policejní hlídce. Ta následně provede kroky nezbytné k zajištění bezpečnosti letového provozu.

V případě, že se nepodaří svazek identifikovat v průběhu letu, bude obrazový záznam uložen na palubě bezpilotního prostředku, odkud může být po přistání stažen a dále analyzován. Z informací o pozici, výšce a dalších metadat spojených s tímto videozáznamem by mělo být i následně možné určit, odkud se svazek šířil, pokud bude v záznamu rozpoznán.

### 2.2 Oblast provozu detekčního bezpilotního systému v okolí letiště

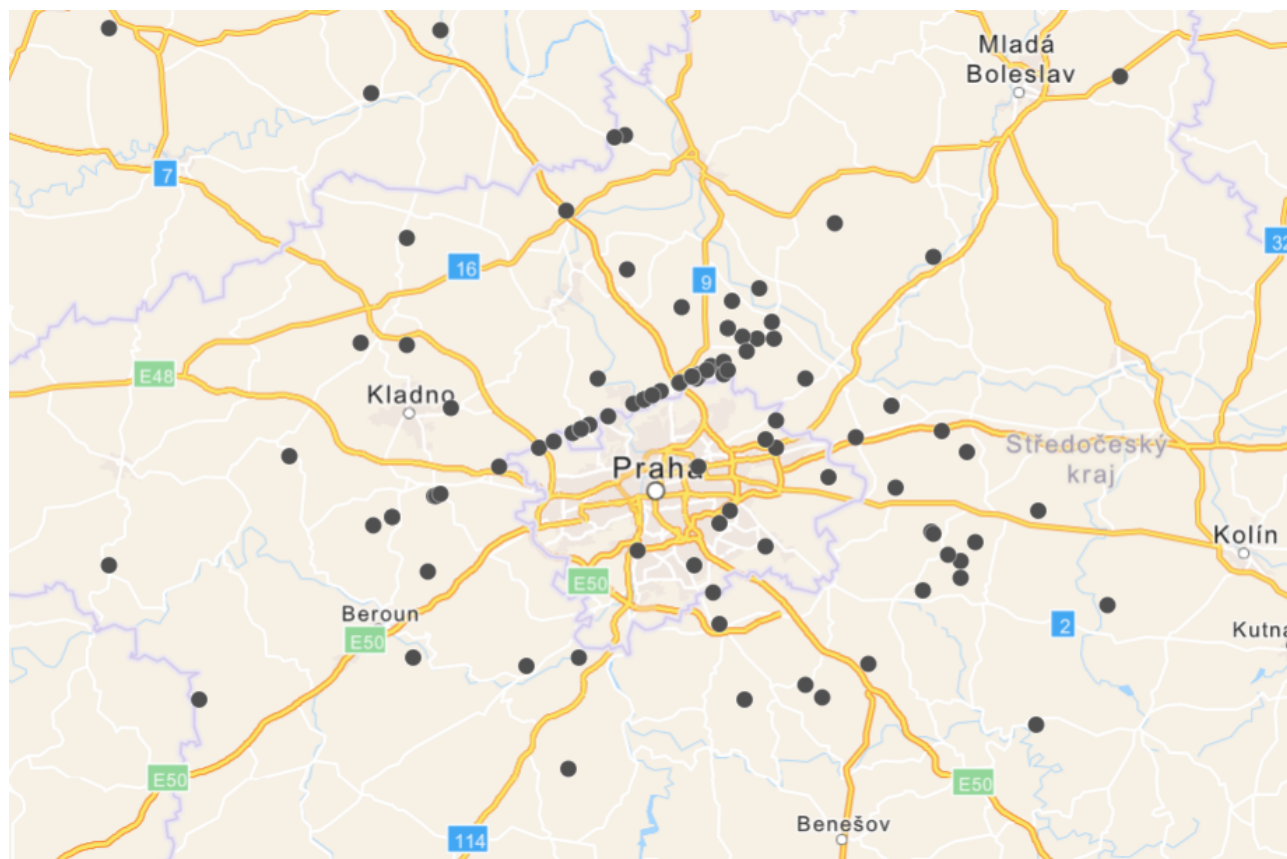
Nejčtenější výskyt laserových útoků bývá zaznamenán u nízko letících letadel, jak je popsáno v teoretické části práce. Tento provoz se z logiky věci vyskytuje převážně v okolí velkých mezinárodních letišť, čemuž odpovídá i geografické rozložení útoků laserovým svazkem v České Republice (obrázek 2.1). Jednotlivé záznamy zobrazené v tomto obrázku představují polohu letadla v okamžiku, kdy na něj byl proveden útok laserem. Nejedná se tedy o polohy útočníků. Je však patrné, že velká část útoků

je soustředěna severně od Prahy. Tato místa s vysokou intenzitou útoků, označená žlutou a červenou barvou, odpovídají oblasti, ve které probíhá konečné přiblížení na RWY 24 na Letišti Václava Havla v Praze.



Obrázek 2.1: Heat mapa s místy, ve kterých byl ohlášen laserový útok na letadlo [13].

Tato runway byla tedy vybrána jako modelový příklad pro tuto práci. Detailní pohled na rozmístění letů v okamžiku laserového útoku v okolí Prahy je k dispozici na obrázku 2.2. Zde je dobře patrné, že velká část letadel se v okamžiku, kdy na ně bylo útočeno laserovým svazkem, nacházela na konečném přiblížení na výše zmíněnou RWY. U zde používaného příkladu se předpokládá, že útok přijde s největší pravděpodobností ze strany letadla, nikoli přímo ze směru letu. To vychází zejména z umístění nejhustěji osídlených oblastí v okolí příletových tratí. Tomuto předpokladu bude uzpůsobena i trajektorie letu bezpilotního letadla. Ten se bude pohybovat paralelně s dráhou letu letadla v bezpečné vzdálenosti na té straně od příletové trati, ze které byl útok hlášen. Senzor sloužící pro zjištění laserového záření bude mířit kolmo k trajektorii letu, směrem od příletové trati letadla, jak znázorňuje obrázek 2.3, kde červená čára představuje laserový svazek a modré úsečky vymezují předpokládaný zorný úhel pilota a detekčního zařízení ve svislé rovině, stejně jako na obrázku 2.5. Tím se dosáhne největší intenzity zaznamenaného záření a v ideálním případě i zásahu snímače nebo jeho těsné blízkosti laserovým svazkem. Čím blíže se snímač ke svazku dostane, tím jasněji lze zpozorovat i zdroj záření na zemi, což bylo experimentálně ověřeno a popsáno v kapitole 3. Pro úplnost bude ale zvaženo i případ, kdy je útok veden ve směru prodloužené osy dráhy.

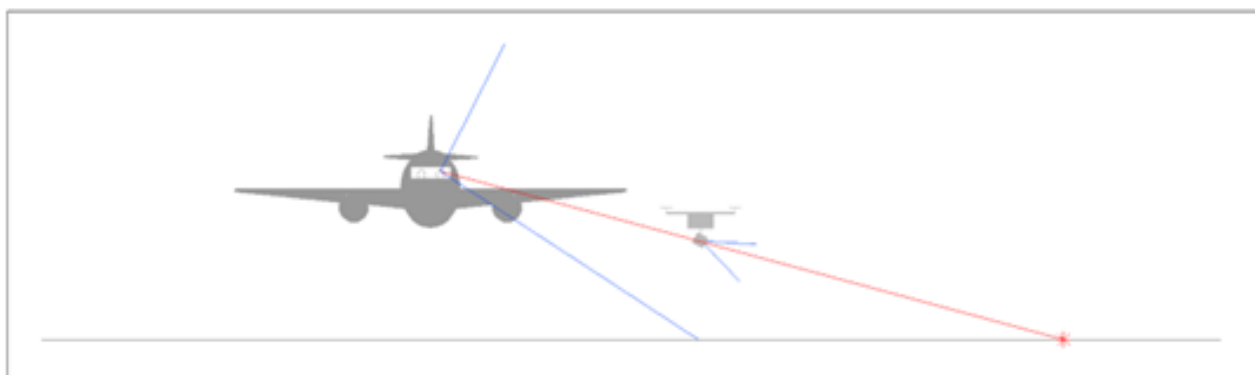


Obrázek 2.2: Mapa zobrazující jednotlivé útoky zaznamenané v okolí Prahy do roku 2022 [13].

Lze namítnout, že pro detekci by mohlo být snazší orientovat senzor paralelně s dráhou letu letadel a vyhledávat svazek jako čáru v obraze. Viditelnost tohoto svazku však závisí na množství částic v atmosféře, na kterých se může rozptylovat, schopnost takový svazek detekovat tedy bude kolísat spolu s výkyvy meteorologické situace [14]. Druhým aspektem ovlivňujícím viditelnost svazku je vyzařovaný výkon daného laseru, který u legálně dostupných zdrojů pro veřejnost, jejichž využití se zde předpokládá, není příliš velký a viditelnost tohoto svazku z kolmého směru je tedy relativně nízká.

Pokud bude průlet neúspěšný, lze jej zopakovat v opačném směru po stejné trajektorii. K tomu může být dálkově řídicím pilotem zvažena možnost změny úhlu naklopení snímače vzhledem k horizontu, aby tak prohlédl i oblasti, které se mohly nacházet při předchozím přeletu mimo zorné pole snímače. Počet přeletů je limitován pouze výdrží baterie, kterou však lze rychle vyměnit při krátkém přistání a následně pokračovat v úkolu.

Ideálním cílem, kterému se bude snažit návrh trajektorie přiblížit, je přímý zásah bezpilotního letadla laserovým svazkem, což zvyšuje šanci na úspěšnou detekci (obrázek 2.3). Splněním tohoto požadavku dostáváme množinu poloh, ve kterých se musí bezpilotní letadlo nacházet v okamžiku



Obrázek 2.3: Schéma detekce laserového svazku.

teoretického zásahu letadla. Pro objasnění principu návrhu trajektorie bezpilotního letadla uvažujme nyní jeden časový okamžik s letadlem ve známé poloze (zeměpisná poloha a výška nad letištěm) na příletové trati, například v bodě konečného přiblížení (FAP). Jelikož laserový svazek míří ze země (předpokládáme útočnicka na zemi, případně blízko zemi) do výšky, ve které se pohybuje ozařované letadlo, míří svazek šikmo vzhůru pod obecným úhlem sevřeným mezi laserem a horizontální rovinou (zemí). Pokud budeme uvažovat případ, kdy bude letadlo laserem zasaženo, což je útočnickovým cílem, bude laserový svazek představovat přímou spojnicí poloh útočnicka a letadla. Pokud se kamkoli na tuto spojnici dostane detekční bezpilotní letadlo se senzorem namířeným tak, aby byl zdroj laserového záření v jeho zorném (detekčním) poli, bude laserový svazek na snímači jasně patrný a bude možné určit odkud přichází. Nyní je tedy nutné vybrat vhodnou polohu bezpilotního letadla na této spojnici a tu následně promítnout do celého úseku, ve kterém se letecký provoz pohybuje.

Čím vyšší bude výška letu bezpilotního letadla a tím pádem čím blíže k letadlu se bude nacházet, tím větší území obsáhne zorné pole snímače a tím snazší bude detekce svazku. Zde však můžeme narazit na potřebu zachování dostatečné vzdálenosti od okolního provozu, aby nedošlo k narušení bezpečnosti. Naopak bezpilotní letadlo letící příliš daleko od letadla bude muset létat déle, než obhlédne stejně velkou plochu, protože poletí níže a v jeho zorném poli se tak bude nacházet mnohem menší část zemského povrchu. Pravděpodobnost úspěšné detekce tak značně klesá. Výhodou by však byla menší vzdálenost od zdroje záření, který bude díky menšímu rozptylu svazku lépe viditelný, a větší vzdálenost o okolního provozu, což zvyšuje bezpečnost. V první fázi mise je však zásadní odhalit jakoukoli známku laserové aktivity, kterou je možné následně ověřit například přivedením bezpilotního letadla blíže k předpokládanému zdroji. Z toho vyplývá vhodnost pohybovat se v co nejmenší vzdálenosti od příletové trati a v případě úspěšného zachycení zdroje svazku k němu bezpilotní letadlo přiblížit, aby byla možná co nejpřesnější lokalizace.



Úsek konečného přiblížení na RWY 24 na Letišti Václava Havla má v horizontální rovině délku přibližně 8,8 NM (16,3 km). Pokud budeme předpokládat let bezpilotního letadla podél celé trati konečného přiblížení, bude bezpilotní letadlo od určité vzdálenosti od letiště provozováno v režimu BVLOS. Bude totiž příliš vzdáleno, aby bylo možno jej spolehlivě identifikovat a rozpoznat jeho prostorovou orientaci pouhým zrakem. To přináší další požadavky na zajištění bezpečnosti provozu. Prostředky pro zmírnění rizik potřebné pro takovýto provoz jsou popsány níže. Pro dálkově řídicího pilota bude mít takovýto provoz výhodu, protože nebude muset bezpilotní letadlo ovládat z místa startu a přistání. Své stanoviště může mít například v kanceláři či operačním středisku, kde může mít k dispozici další technické zázemí a vybavení. To mu může být nápomocné při jeho práci a umožnit například přístup k jinak nedostupným informacím a nástrojům. Limitem by byla výměna baterie, kterou je u většiny strojů nutné provést manuálně. To lze však vyřešit jinou osobou pohybující se v blízkosti místa přistání, která bude mít dostatek času se na místo dopravit během prvního letu, aby mohla výměnu baterií provést. Toto závisí na místě, odkud bude bezpilotní letadlo provozováno, kým bude provozováno a na vzájemné koordinaci s dalšími složkami. Touto osobou by mohl být například příslušník PČR, Ostrahy letiště či jiný personál. Pro dálkově řídicího pilota by takováto spolupráce byla výhodná, neboť by se mohl plně soustředit na provedení svého úkolu a nemusel by se věnovat fyzické manipulaci se strojem. Výměna baterií není odbornou činností. Po zaškolení a za dodržení základních bezpečnostních pravidel by ji mohl vykonávat také například pracovník odbavení letadel, neboť toto oddělení bývá v nočních hodinách vytíženo méně než během dne a tito zaměstnanci mívají přímý a rychlý přístup na letištní plochu.

## **2.3 Možnosti letu v CTR - legislativa, koordinace**

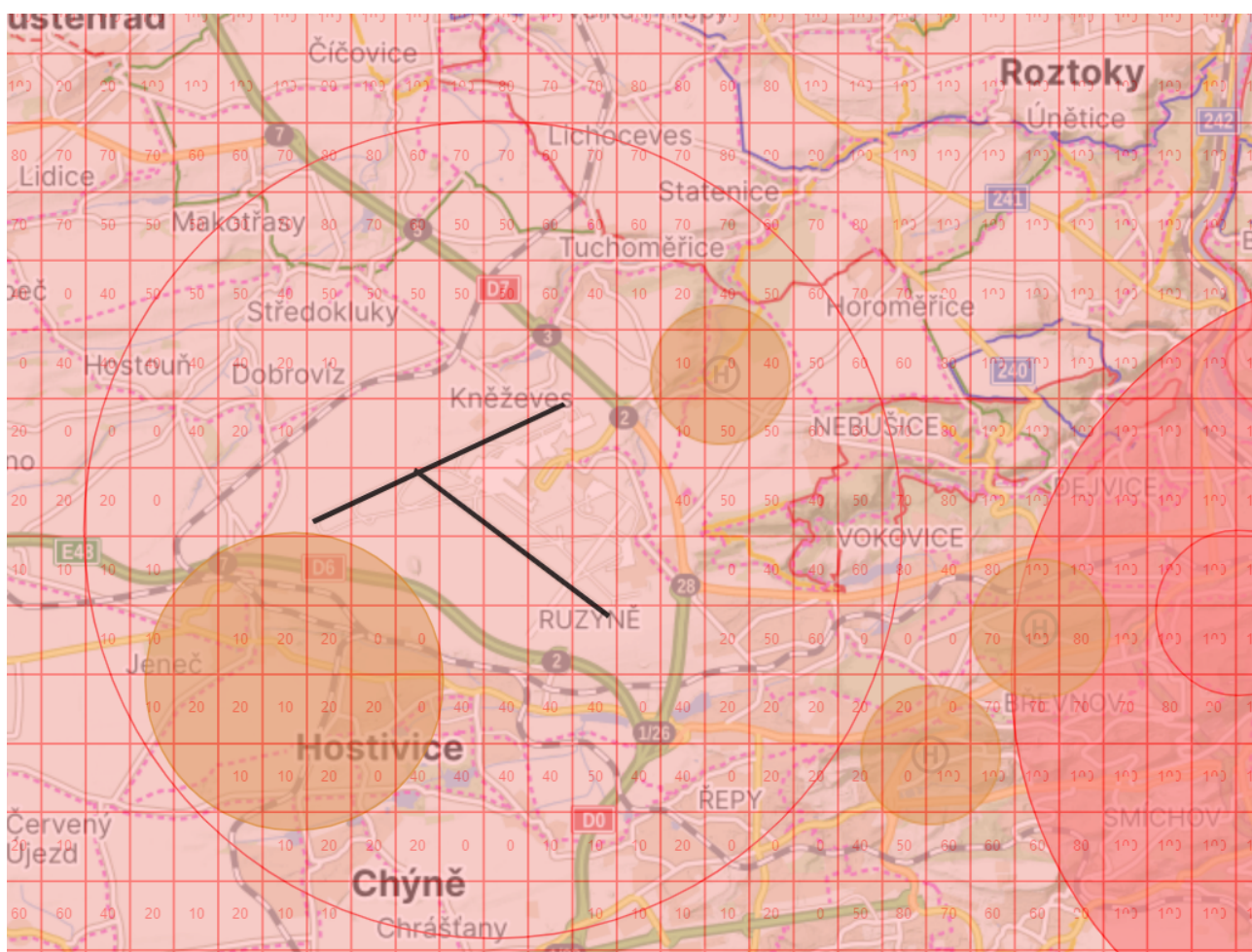
Jednou z největších překážek v navrhovaném způsobu detekce je legislativa upravující provoz bezpilotních prostředků v okolí řízených letišť, jakým je i Letiště Václava Havla. Je to pochopitelné, neboť primárním cílem předpisů upravujících pohyb bezpilotních prostředků v prostorech, kde je zároveň zvýšený pohyb letadel s osobami na palubě, je zajištění bezpečnosti těchto letů. Kvůli tomu jsou lety bezpilotních prostředků limitované, zejména v prostorech CTR. V následujících odstavcích jsou představeny čtyři základní scénáře, podle kterých je, nebo by mohlo být, možné provozovat bezpilotní letadla v tomto vzdušném prostoru.

### **2.3.1 Provoz bez koordinace**

V prostorech CTR jsou publikována pravidla pro lety UA bez koordinace v podobě takzvaného gridu. Jde o grafickou síť tvořenou pravidelnými obdélníky podkreslenou mapovým podkladem, kdy pro každý takový obdélník je určena maximální povolená výška letu UA [15]. Část tohoto gridu pro pražské CTR je k vidění na obrázku 2.4. Pro lety mimo pravidel udaných gridem je nutná koordinace



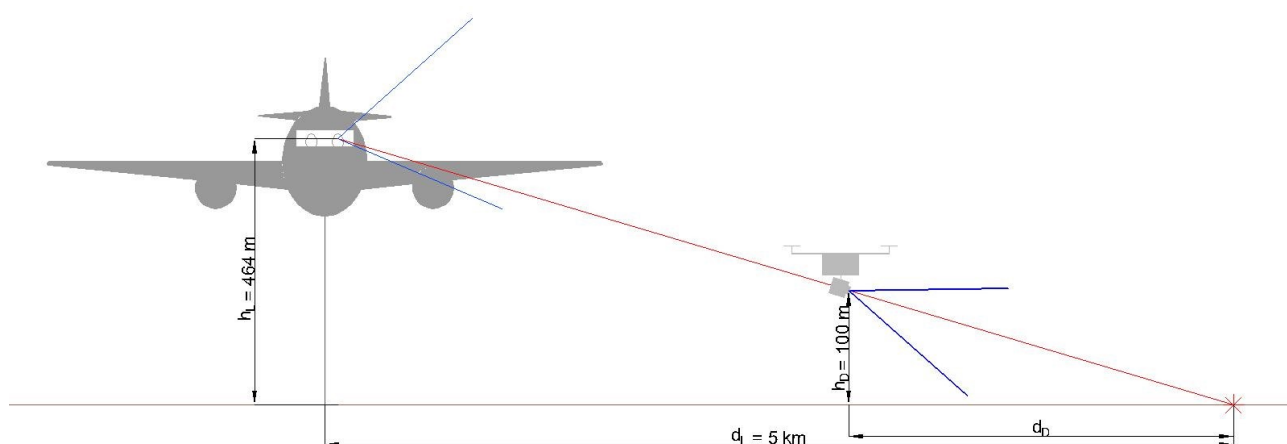
s leteckými autoritami, jak je popsáno dále. Pokud by se pohyb bezpilotního letadla řídil striktně pravidly, která nevyžadují žádnou koordinaci ani povolení od žádné autority, vztahovalo by se na tento provoz několik omezení. V první řadě by nebylo možné operovat v okruhu do 5,5 kilometru od letiště. Zde je provoz bez koordinace umožněn pouze pro bezpilotní letadla o hmotnosti nižší než 0,91 kg a pouze vně ochranných pásem letiště [15]. Vzhledem k technickým požadavkům na bezpilotní systém se očekává jeho hmotnost dosahující několika kilogramů, pravidla pro bezpilotní letadla o nižší hmotnosti tedy nejsou pro tuto práci relevantní. Vertikálně by pak byl pohyb omezen jednak ochrannými pásmy letiště, jednak hodnotami gridu pro danou geografickou oblast. Maximální výška letu je tak omezena na 100 metrů nad terénem, a to většinou v oblastech, kde se letecký provoz nevyskytuje. Ty lze identifikovat na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Podoba gridu v okolí LKPR [16].

Pro ilustraci nedostatečné výšky povolené v tomto režimu provozu, uvažujme následující modelovou situaci: Letoun přistávající na letišti se nachází 4 námořní míle od prahu dráhy, tedy přibližně v polovině konečného přiblížení. Jeho výška je zde asi 2420 stop altitude, tedy 738 metrů nad mořem [17]. Terén v těchto místech dosahuje výšky přibližně 274 metrů nad hladinou moře. Po odečtení těchto dvou hodnot vypočteme výšku letadla nad terénem, v tomto případě je to 464 metrů.

Umístíme nyní útočnicka s laserem na úroveň tohoto letadla do vzdálenosti 5 kilometrů od osy RWY. Zanedbejme členitost terénu a předpokládejme, že celé širší okolí prostoru konečného přiblížení se nachází v nadmořské výšce shodné s výškou terénu, který letadlo právě přelétá, tedy 274 metrů nad mořem. Tím pádem také vertikální vzdálenost útočnicka a letadla je shodná s výškou letu letadla nad terénem, v našem případě 464 metrů, jak je znázorněno na obrázku 2.5. Jelikož mezi zdrojem laseru, letadlem a bodem na zemském povrchu přímo pod letadlem vznikl pravoúhlý trojúhelník, u něhož známe délku obou odvěsen, můžeme s použitím goniometrické funkce dopočítat úhel  $\alpha$ , který svírá laserový svazek s vodorovnou rovinou, v našem případě s terénem. Výpočet je zaznamenán v rovnici 2.1.



Obrázek 2.5: Ilustrace laserového útoku a vyhledávání útočnicka s okótovanými vzdálenostmi a výškami.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{h_L}{d} = \tan^{-1} \frac{464 \text{ m}}{5000 \text{ m}} = 5,3^\circ, \quad (2.1)$$

kde  $\alpha$  je úhel sevřený mezi laserovým svazkem a zemí ve stupních,  $h_L$  je výška letu letadla nad terénem v m a  $d$  je horizontální vzdálenost letadla od laserového zdroje v m.

Díky známému úhlu mezi laserem a zemí jsme nyní schopni určit maximální vzdálenost, ve které se může pohybovat bezpilotní letadlo, aby splnilo požadavek na let ve výšce maximálně 100 metrů nad zemí a aby bylo stále schopno vlétnout do laserového svazku a tím jej zaznamenat optickým snímačem. Pro tento výpočet byl použit postup popsáný v rovnici 2.2.

$$\tan \alpha = \frac{h_D}{d_D} \implies d_D = \frac{h_D}{\tan \alpha} = \frac{100 \text{ m}}{\tan 5,3^\circ} = 1078 \text{ m}, \quad (2.2)$$

kde  $\alpha$  je úhel sevřený laserovým svazkem a zemí ve stupních,  $h_D$  je výška letu bezpilotního letadla nad terénem v m a  $d_D$  je maximální vzdálenost bezpilotního letadla od zdroje laserového záření v m.



Z tohoto výpočtu tedy vyplývá nutnost letu bezpilotního prostředku velmi blízko ke zdroji laserového záření. Vzhledem k omezenému zornému úhlu senzoru umístěnému na bezpilotním letadle klesá s klesající výškou také prostor, který může být v jeden okamžik nasnímán. Tím klesá i prostor pro chybu. Například pokud by pilot zasaženého letadla špatně odhadl vzdálenost a laser se ve skutečnosti nacházel o kilometr blíže k letadlu, není již šance tento útok bezpilotním letadlem zaznamenat. Tam, kde hodnoty gridu umožňují let jen několik desítek metrů nad terénem, je tato náchylnost k chybě ještě větší. A pokud se bude útočník pohybovat v oblastech, kde jsou hodnoty gridu rovny nule, není možné jej touto metodou odhalit vůbec. Výhodou tohoto druhu letu je však viditelnost více detailů terénu nasnímaného snímačem.

### **2.3.2 Předem koordinovaný a schválený provoz uvnitř CTR podle pravidel VLOS**

Pokud je potřeba provést let ve výšce vyšší, než jakou povoluje hodnota gridu v daném místě, požaduje se po provozovateli bezpilotního letadla nejméně 3 dny před plánovaným letem koordinace takového letu s provozovatelem letiště. Na veřejných mezinárodních letištích v Praze, Brně, Ostravě a Karlových Varech je navíc nutná i koordinace s pracovištěm pro uspořádání vzdušného prostoru, kam je nutno doručit žádost o nestandardní let (NSF). Příslušné stanoviště ŘLP může pro schválení takového letu dále vyžadovat telefonickou žádost o letové povolení od letištní věže, stálé obousměrné spojení se stanovištěm ŘLP nebo vybavení bezpilotního letadla odpovídačem sekundárního radaru. Rozhodnutí o stanovení těchto požadavků závisí na uvážení příslušného stanoviště ŘLP [15], [18]. Při požadavku na let v CTR ve výšce vyšší než 100 metrů nad terénem musí provozovatel požádat Úřad pro Civilní Letectví (ÚCL) o vydání Oprávnění k Provozu (OkP). Na jeho základě lze tuto hodnotu překročit až do výšky povolené v Oprávnění. Pro vydání OkP je nutno doložit na ÚCL výstupy z procesu SORA – Specific operations risk assessment, jehož součástí je i zhodnocení rizik, která může provoz vyvolat svou činností na zemi a ve vzduchu. Toto probíhá vyhodnocením takzvaných Ground risk class (GRC) a Air risk class (ARC).

Pro určení GRC se bude vycházet z maximálního charakteristického rozměru bezpilotního letadla, který umožňuje odhadnout očekávanou specifickou kinetickou energii stroje, a provozní scénář, podle kterého bude let probíhat. Pro tuto práci uvažujeme bezpilotní letadlo s charakteristickým rozměrem do 1 m a provozním scénářem bude VLOS nad řídce zalidněnou oblastí. Z toho vychází hodnota Vlastní třídy rizika na zemi označená číslem 2. Pokud by byl použit stroj s maximálním charakteristickým rozměrem větším než 1 m, ale nepřesahujícím 3 m, vzrostla by tato Vlastní třída rizika na hodnotu 3. Konečná GRC se pak určí součtem této hodnoty a případné hodnoty vycházející z přijatých zmírňujících opatření spolu s mírou robustnosti bezpilotního letadla. I kdyby však nebyla



přijata žádná zmírňující opatření, výsledná GRC nebude dosahovat hodnoty vyšší než 3.

Pro určení Air risk class se využije požadavek na let uvnitř CTR, které lze považovat za typický vzdušný prostor, z čehož vychází hodnota ARC-a. Následně lze určit hodnotu SAIL (Specific Assurance Integrity Level), ze které je možno vyvodit, zda provoz spadá do specifické nebo certifikované kategorie. V tomto případě, tedy s GRC ne vyšší než 3 a ARC-a jde o hodnotu SAIL II, která spadá do kategorie specifické.

Z pohledu pracovníků ŘLP se na bezpilotní letadlo v CTR (vzdušný prostor třídy D) nahlíží stejně jako na let VFR. Tím, že jde o vzdušný prostor třídy D, se mu nezajišťují rozstupy vůči okolnímu provozu. Úkolem stanoviště ŘLP však zůstává povinnost zabraňovat srážkám a poskytovat informace o provozu, případně na vyžádání také radu k vyhnutí [19]. To však znamená, že neexistuje požadavek na minimální vzdálenost bezpilotního letadla od okolního provozu. Požadováno je pouze, aby bylo zabraňováno srážkám a aby nedošlo k narušení osy dráhy, což je zajištěno vydaným letovým povolením. Rozhodnutí o vzdálenosti bezpilotního letadla od osy dráhy a od okolního provozu je tedy přenecháno na jeho dálkově řídicím pilotovi, v tomto případě na vhodné tvorbě letového scénáře, kterým se bude automaticky let řídit a na jeho následném schválení příslušným pracovníkem ŘLP v procesu udělení letového povolení.

V praxi by taková situace probíhala následovně: Po přijetí informace o nebezpečné laserové aktivitě a vyhodnocení situace by příslušný orgán (například LS PČR) vydal pokyn k aktivaci bezpilotního letadla a k zahájení letu za účelem vyhledávání útočnicka. Dálkově řídicí pilot bezpilotního letadla by na základě dostupných informací zvolil vhodnou trajektorii letu vzhledem k poloze výskytu útoku. Před samotným vzletem by navázal spojení s letištní věží (telefonicky nebo na radiové frekvenci), jejímž pracovníkovi by předal potřebné informace o zamýšlené aktivitě a od kterého by obdržel spolu s letovým povolením také aktuální informaci o okolním provozu. Mohl by být zmíněn konkrétní scénář, podle kterého bude let prováděn. Vzhledem ke koordinaci, která by měla předcházet nasazení takového systému, by mohl ATCO mít detailní popis těchto scénářů u sebe. Zjednodušilo a zkrátilo by to potřebnou komunikaci s dálkově řídicím pilotem a poskytlo by to ATCO veškeré potřebné informace jako například nejmenší vzdálenost od osy dráhy, do které bezpilotní letadlo za standardní situace dostane. Během letu bezpilotního letadla bude muset stanoviště tower, případně approach, podávat dotčeným letům informaci nejen o zaznamenané laserové aktivitě, jak tomu bylo doposud, ale také o pohybu bezpilotního letadla. Pokud bude bezpilotní letadlo vybaveno odpovídačem sekundárního radaru, případně systémem ADS-B, což by vzhledem k povaze provozu bylo vhodné, bude toto bezpilotní letadlo zobrazováno na palubních systémech letadel pohybujících se v okolí. To zlepšší



povědomí pilotů o aktuální situaci. Pro ATCO by se v této situaci mohla krátkodobě zvýšit pracovní zátěž. K běžným povinnostem se totiž přidá monitorování letu bezpilotního letadla a v případě potřeby poskytování rad k zabránění srážce. Celý letový scénář však bude navržen tak, aby takováto situace byla co nejméně pravděpodobná.

Jediné lety, pro které by toto bezpilotní letadlo mohlo představovat nebezpečí, by byly lety policie nebo záchranné služby, případně lety SAR, u kterých je reálná možnost křížování trajektorie letu bezpilotního letadla. V takovém případě je za vyhnutí odpovědný ATCO na stanovišti tower. Ten vydá náležitou informaci o provozu, na kterou by dálkově řídicí pilot reagoval změnou směru letu nebo výšky tak, aby bylo zajištěno vyhnutí. Případně, pokud by to bylo možné a dálkově řídicí pilot bude obeznámen s terénem a zástavbou v daném místě, mohlo by bezpilotní letadlo přistát v nejbližším okolí a pokračovat ve svém letu po vykřížování prioritního provozu. V každém z těchto případů bude nutné převzetí kontroly nad bezpilotním letadlem dálkově řídicím pilotem, případně zásah dálkově řídicího pilota v podobě inicializace jiného automatického letu, nejspíše funkce návratu na místo vzletu nebo letu na předem určené místo přistání ve vhodné výšce. V případě, že dálkově řídicí pilot nevidí okolní provoz, má právo na radu k vyhnutí od stanoviště řízení letového provozu.

Lety UAS v CTR za VLOS jsou tedy možné, pokud jsou s dostatečným předstihem koordinovány a schváleny příslušnými orgány a jsou splněny všechny požadavky, kterými může být takové schválení podmíněno. Oprávnění k Provozu lze vydat na delší časový úsek, například jeden rok, během něhož může být provedeno více letů za předpokladu, že budou vždy dodrženy podmínky obsažené v OkP. To však nemusí platit pro koordinaci s provozovatelem letiště a poskytovatelem letových provozních služeb (ATS), ačkoliv se nepředpokládá odpor těchto orgánů z důvodu společného zájmu o zajištění maximální bezpečnosti letového provozu. Toto lze ošetřit například vznikem koordinační dohody mezi provozovatelem bezpilotního systému a ŘLP, případně i provozovatelem letiště.

### **2.3.3 Předem koordinovaný a schválený provoz uvnitř CTR podle pravidel BVLOS**

Stejně jako v předešlém případě, i pro let BVLOS bude nutné získat OkP na základě vyhodnocení SORA. V části GRC dochází za podmínek BVLOS ke zvýšení vlastní třídy rizika na zemi o jeden bod v porovnání s VLOS. Pro zachování výsledné SAIL na úrovni 2 by tedy nesměl maximální charakteristický rozměr bezpilotního letadla přesáhnout 1 metr a nebo by musela být zvýšena robustnost bezpilotního systému, což by snížilo výslednou GRC. Dále je nutno zachovat bezpečnou vzdálenost bezpilotního letadla od okolního provozu, za kterou zodpovídá příslušný ATCO. Pro tuto vzdálenost dnes neexistuje jednoznačně určená hodnota. Není také jasné, jestli se ATCO může spolehnout na informace přijaté od odpovídače nebo systému ADS-B na palubě bezpilotního



letadla. Expertní týmy ICAO totiž našly problém s funkčností těchto systémů umístěných na palubě bezpilotních letadel. Tím by se tato zařízení mohla považovat za nespolehlivá a ATCO by jejich výstupy v takovém případě nemohli využít pro svou práci. V současnosti tak v úvahu přichází jediná možnost a to provoz uvnitř segregovaného prostoru, kam nebude umožněn vstup jiným letadlům. Veškerá tato problematika by se vyřešila, pokud by bylo použito plně certifikované bezpilotní letadlo schopné letu podle pravidel IFR. Zde by bylo možné spolehnout se na jeho technické prostředky a zajišťovat mu rozstupy od okolního provozu. Obecně by bylo možno využít standardní pravidla pro provoz IFR v CTR, která se dnes běžně aplikují a existuje pro ně komplexní legislativní základna. Toto by představovalo ideální řešení, autorovi však existence takového bezpilotního letadla není známa.

#### **2.3.4 Let pro zajištění plnění úkolu Policie ČR**

Pokud by nebylo možné využít postupy pro civilní provoz, mohou být použity ještě dvě alternativy, které autor identifikoval. První z nich by byl zvláštní režim provozu operovaný orgánem, na který se pravidla popsána výše striktně nevztahují. Mezi ně patří například složky IZS, vzhledem k jejichž činnosti za účelem detekce a lokalizace pachatele by šlo nejspíše o Policii České republiky, konkrétně o její Leteckou službu (LS PČR), která sídlí přímo na Letišti Václava Havla a která lety za stejným účelem provádí i nyní, jak bylo popsáno výše. Bylo by tím legislativně ošetřeno i přelétávání nad zastavěnými oblastmi, liniovými stavbami a jejich ochrannými pásmy a případně dalšími územími, kde je běžný provoz bezpilotních prostředků limitován.

Podle § 44h odst. 5 zákona č. 49/1997 Sb. o civilním letectví – znění od 01.07.2023 je „příslušník Policie České republiky oprávněn vydat pokyn, jímž v nezbytném rozsahu a na dobu nezbytně nutnou zakáže, omezí nebo stanoví podmínky užívání vzdušného prostoru České republiky k létání bezpilotních letadel nad vymezenými oblastmi, je-li takový pokyn nutno vydat okamžitě z důvodu plnění úkolu Policie České republiky [12]. Tento paragraf si lze tedy vyložit tak, že pokud je to nutné, může Policie ČR v rámci plnění svých úkolů provozovat bezpilotní letadla i v místech a době, kde běžný provoz není umožněn.

Dále podle § 50 odst. 3 zákona č. 49/1997 Sb. o civilním letectví – znění od 01.07.2023 platí, že „nelze-li jinak zajistit bezpečnost osob, majetku či veřejný pořádek, lze se výjimečně při létání policejních letadel v rozsahu zcela nezbytném odchýlit od pravidel létání“ [12]. Tím, že laserové útoky na letadla ohrožují bezpečnost letového provozu a mohou být hrozbou jak pro posádku, tak pro cestující a jedná se tudíž o protiprávní jednání, lze tento paragraf, podle výkladu autora, použít pro ospravedlnění provádění letu bezpilotního letadla v blízkosti letiště i mimo obecně povolené oblasti



a výšky. Stále by však měla být zajištěna koordinace se stanovištěm řízení letového provozu, aby nebyla ohrožena bezpečnost letadel pohybujících se v oblasti provozu bezpilotního letadla.

### **2.3.5 Vznik dedikovaného vzdušného prostoru**

Další možností, jak provozovat bezpilotní letadlo nad rámec aktuálně platných legislativních omezení, je úprava legislativy samotné. Aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění nedotčeného provozu a pro zajištění maximální kompatibility s účelem takové úpravy, navrhuje autor vznik dedikovaného omezeného prostoru v souladu s předpisem L 11 [19]. Tento prostor by se vztahoval pouze na bezpilotní letadla a nacházel by se v místech nejpravděpodobnějšího a nejčastěji očekávaného použití tohoto detekčního systému, jak je popsáno výše v této kapitole.

Navrhovaný vzdušný prostor by neměl žádný dopad na ostatní provozovatele bezpilotních prostředků – neznamenal by zpřísnění ani uvolnění pravidel pro lety bezpilotních prostředků v dané oblasti, neboť by nezasahoval do prostor, kde je běžný provoz umožněn a jeho využívání by bylo umožněno pouze na základě předchozího povolení ÚCL s výjimkou letů, kterých se přítomnost omezeného prostoru netýká. Mezi ně patří například policejní lety nebo lety bezpilotních letadel po povolení uživatele prostoru [20]. To by umožňovalo provádění navrhovaných detekčních letů nejen PČR, ale i dalším subjektům, například provozovateli letiště. Vznik tohoto prostoru včetně vymezení všech charakteristik a pravidel s ním spojených by zřejmě proběhl vydáním Opatření obecné povahy, jak tomu bylo v případě zavedení omezeného vzdušného prostoru LKR10 – UAS [15]. Také provoz v tomto novém prostoru nebo souboru více prostorů by byl vázán na koordinaci se stanovištěm řízení letového provozu za účelem zajištění maximální bezpečnosti okolního leteckého provozu. Při letu bezpilotního systému v tomto prostoru by měl ATCO přesnou informaci o tom, kde může tento provoz očekávat a jakým způsobem zajistit, aby se okolní provoz do tohoto prostoru nedostal.

### **2.3.6 Shrnutí**

Ve všech výše zmíněných případech se předpokládá vybavení bezpilotního letadla systémem pro dálkovou identifikaci (Remote ID a odpovídač sekundárního radaru). To umožní dálkově identifikovat provozovatele bezpilotního letadla, ale také určit přesnou polohu stroje. ATCO tak budou mít k dispozici vždy aktuální informaci o poloze, kterou budou moci předávat přilétávajícímu provozu, případně nařídit změnu trasy letu bezpilotního letadla, pokud by hrozilo nebezpečí srážky s jiným letadlem. Z toho vyplývá požadavek na stálé obousměrné rádiové spojení mezi dálkově řídicím pilotem bezpilotního letadla a příslušným stanovištěm ŘLP.



Jako problematické se může jevit technické řešení vybavení bezpilotního letadla odpovídačem sekundárního radaru. Studie provedená expertním týmem ICAO zjistila technické problémy s funkčností SSR odpovídačů, ADS-B a ACAS systémů v oblastech s výskytem velkého počtu bezpilotních systémů vybavených vysílačem ADS-B OUT pracujícím na frekvenci 1090 MHz. Je tedy možné předpokládat změnu legislativních požadavků na technické vybavení bezpilotních systémů. V současnosti je však umístění SSR odpovídače, případně vysílače ADS-B signálu možné a může být vyžadováno pro udělení letového povolení.

Z pohledu dnešní legislativy tedy je možné provozovat bezpilotní letadla uvnitř CTR i ve výškách vyšších, než jaké umožňuje grid, k tomu je však potřeba splnit několik podmínek. Nepředpokládá se však, že by měl některý z orgánů zapojených do schvalovacího procesu takového provozu výrazné námitky proti schválení těchto letů, protože se bude jednat o zvláštní lety za účelem zvýšení bezpečnosti letového provozu, které se budou řídit přesnými, předem danými pravidly, budou provozovány schválenou organizací a budou řízeny dálkově řídicím pilotem vyškoleným pro tento druh pohybu bezpilotního letadla v blízkosti letadel. To neplatí pro let BVLOS, který je v současnosti velmi problematický.

## 2.4 Vhodné bezpilotní letadlo

Z pohledu hardware je primární složkou navrhovaného bezpilotního systému (UAS) nosič užitečného zatížení – bezpilotní letadlo (UA). Pro účely vyhledávání zdrojů laserového záření se jeví jako nejvhodnější konstrukce multikoptéra, která dokáže, na rozdíl od většiny konvenčních bezpilotních letounů nebo samokřidel, viset na jednom místě. To může být užitečné v případě pozitivní detekce pro upřesnění lokality zdroje. Také nižší letová rychlost je zde výhodou, neboť obraz bude nutné zpracovávat manuálně a vyšší rychlost pohybu by mohla vyhodnocení záznamu znesnadňovat. Počet rotorů ani jejich konfigurace není rozhodující.

Vhodný bude stroj s možností výměny užitečného zatížení. Stroje, které takovou možnost postrádají, bývají vybavené snímačem, který nemusí přesně odpovídat specifickým požadavkům na vyhledávání laserových svazků. Oproti tomu bezpilotní letadla určená k výměnám senzorů a snímačů, která lze označit jako nosiče užitečného zatížení, mívají často i možnost softwarového zásahu do samotného stroje, při nejmenším prostřednictvím API poskytnutého výrobcem. To poskytuje více volnosti při ovládání stroje i senzoru a umožňuje také lepší práci s nasbíranými daty. Takto vybavené nosiče mívají zpravidla hmotnost přinejmenším několik kilogramů. Vyšší hmotnost je následkem výkonnějších pohonných jednotek, baterií a robustnější konstrukce, které mají za cíl podporovat větší





hmotnost užitečného zatížení, čímž roste škála jejich využití.

S ohledem na velikost území, které bude nutné monitorovat, je důležité dbát už ve fázi příprav na vhodný battery management. Systém by měl v ideálním případě disponovat funkcí hot swap, která umožňuje výměnu baterií bez nutnosti vypnutí celého stroje. Díky tomu může stroj po výměně baterií okamžitě pokračovat v misi a není nutné znovu čekat na spuštění systému, nalezení dostatečného množství GNSS satelitů ani do něj znovu nahrávat letový plán. Tím se výrazně sníží čas, který bezpilotní letadlo stráví na zemi a zvýší se tím šance na úspěšné nalezení útočnicka.

Zmíněná vyšší hmotnost bezpilotního letadla představuje jisté riziko pro osoby a objekty na zemi, které je nutno minimalizovat. Vhodné bude použít letadlo s dostatečně robustní výbavou v podobě záložních systémů pro případ, že ty primární selžou. Schopnost nouzového přistání s jedním, případně více, nefunkčními motory také přispěje ke snížení rizik. Rozšířeným bezpečnostním prvkem je padákový systém, při jehož aktivaci dojde kromě vystřelení padáku, také k zastavení všech pohonných jednotek, primárně aby nedošlo k poškození úvazu padáku, zároveň se tím ale eliminuje i riziko spojené s kontaktem s rotujícími vrtulemi. Za zvážení stojí vybavení stroje směrovými světly, které by mohly být namířeny směrem k dálkově řídicímu pilotovi, případně pozorovateli, aby se tak zvýšilo povědomí těchto osob o aktuální poloze bezpilotního letadla.

Letecký provoz v CTR může být velmi hustý a je důležité, aby měli ATCO přehled o přesné poloze, výšce a dalších aspektech veškerého provozu, který se zde nachází. Velmi vhodné bude tedy vybavit zde provozované bezpilotní letadlo odpovídáčem sekundárního radaru, případně zařízením umožňujícím dálkovou identifikaci, tzv. Remote ID, jak vyžaduje evropská legislativa [21]. Je také možné vybavit bezpilotní letadlo systémem ADS-B, což by v tomto případě zajistilo redundanci zařízení na palubě využívaných přehledovými systémy, případně by mohla být zvýšena přesnost určování polohy bezpilotního letadla.

Pro snížení reakční doby a co nejrychlejší započítání mise může být v místě vzletu umístěna dokovací stanice určená pro automatické vzlety a přistání bezpilotních prostředků a pokud není letadlo používáno, poskytuje ochranu před meteorologickými vlivy, zdroj energie a přístup k dálkově posílaným pokynům z ovládacího software. Takovou stanicí může být například DJI Dock vyobrazený na obrázku 2.6.

Výše popsané požadavky splňuje například stroj Matrice 300 nebo 350 čínského výrobce DJI zobrazený na obrázku 2.7. Pro toto bezpilotní letadlo však zatím není autorovi známá možnost



Obrázek 2.6: Automatický hangár DJI Dock [22].

využití v kombinaci s automatickou dokovací stanicí. Další možností může být Matrice 30 od stejného výrobce, vyobrazená na obrázku 2.8. Ta je určena především pro použití složkami IZS a podporuje provoz z dokovacích stanic. Nevýhodou je však trvale připevněná sada snímačů, které nelze vyměnit. Pokud by však experimenty v praxi ukázaly dostatečnou použitelnost pro odhalení laserového svazku, byla by to zřejmě nejlepší možnost, o které má aktuálně autor povědomí.



Obrázek 2.7: DJI Matrice M350 s kamerou H20 [23].

## 2.5 Detekce laserového svazku – kamera a zpracování obrazu

Důležitou součástí použitého bezpilotního systému bude senzor schopný zaznamenávat a přenášet data, která by mohla obsahovat informace o výskytu laserového záření. S největší pravděpodobností půjde o optický senzor, ať už v podobě běžné RGB kamery či speciálního snímače citlivého na určité



Obrázek 2.8: DJI Matrice M30 [24].

vlnové délky, aby byla podpořena šance na rozeznání útočného svazku.

V červnu roku 2022 a březnu roku 2023 byla provedena série experimentů, jejichž účelem byl sběr dat o laserových svazcích a možnostech jejich detekce. Kromě pracovníků a studentů ČVUT se těchto měření účastnili zaměstnanci Univerzity Obrany (UNOB) a Fakulty informačních technologií VUT v Brně. Experimenty probíhaly na Posádkovém cvičišti Jince, které je součástí vojenského prostoru v pohoří Brdy severně od Příbrami. Tento prostor byl vybrán mimo jiné kvůli minimalizaci nebezpečí náhodného zásahu nezapojených osob laserovým svazkem. Svou vzdáleností od obydlených oblastí byla také snížena míra rušivého umělého osvětlení, které mohlo mít zkreslující vliv na měření probíhající v noci.

V rámci těchto experimentů byla provedena, mimo jiné, série letů bezpilotního letadla vybaveného duální (optickou a infračervenou) kamerou schopnou zaznamenávat video, které bylo použito pro následné vyhodnocení experimentů. Tyto lety sloužily z části jako simulace letu letounu pro potřeby výzkumníků z Univerzity obrany, kteří testovali schopnost přesně směřovat laserový svazek na



letadlo s použitím různých druhů uchycení a stabilizace zdroje záření. Druhou sadou experimentů využívajících bezpilotní letadlo, určených i pro tuto práci, bylo testování viditelnosti laserového svazku běžnou kamerou pod různými úhly a z různých vzdáleností.

Bezpilotní systém se skládal z bezpilotního letadla DJI M600, ovladače a kamery Zenmuse XT2, která disponuje dvěma snímači, jak bylo zmíněno výše. Optický senzor byl vybaven 12Mpix CMOS čipem, jeho ohnisková vzdálenost byla 8 mm a zorné pole obsáhlo úhly  $57,12^\circ \times 42,44^\circ$ . Použité rozlišení videozáznamů bylo 1920×1080p při 30 snímcích za sekundu. Termokamera s maximálním rozlišením 640×512p byla použita primárně pro lepší názornost pohybu bezpilotního letadla, neboť v nočních hodinách k tomuto účelu nebylo možné použít výstupy z optické kamery [25]. Tato optická kamera je dále uvažována jako modelový příklad pro výpočty letových charakteristik v následujících kapitolách. Zdroj laserového záření měl výkon 72 mW.

Byly provedeny dva experimenty. Výchozí pozice bezpilotního letadla a laseru byla pro oba stejná: Bezpilotní letadlo viselo ve výšce 105 metrů a vzdálenosti 540 metrů od zdroje laserového záření a svazek byl namířen, pokud možno, přímo do snímače, což se v záznamu projevilo značně zvýšenou intenzitou světla. Od této výchozí polohy se bezpilotní letadlo následně vzdalovalo, v prvním experimentu horizontálně, ve druhém vertikálně. Bylo zkoumáno, jak se projevovala rostoucí vzdálenost od svazku na výsledném obrazu zaznamenaném na kameru. Podmínky během experimentů byly stabilní bez význačných meteorologických jevů, které by měly na výsledky vliv. Příklady výstupů z těchto měření jsou k vidění na obrázcích 3.8, 3.9, 3.10 a 3.11 a jsou detailněji popsány v kapitole 3.2.

Pro lepší orientaci v obraze za tmy by bylo vhodné použít snímač určený pro noční vidění. Jedním takovým je vybavena kamera Zenmuse H20N, která kromě laserového dálkoměru a duální termokamery obsahuje i širokoúhlý a zoomovací snímače určené pro noční vidění. Toho by mohlo být využito při pokusech o určení polohy útočníka.

## 2.6 Lokalizace útočníka

Celý navrhovaný systém má přispět k rychlejší a přesnější lokalizaci útočníka. K tomu je potřeba znát polohu bezpilotního letadla, směr natočení gimbalu s kamerou a možnost rozeznat v obraze významné prvky, které mohou pomoci s orientací, jako například budovy, komunikace a jiné prvky infrastruktury. Z informací o přesné poloze bezpilotního letadla včetně výšky v momentě pozitivní detekce laserového útoku jsme schopni určit jeden bod v prostoru, kudy svazek prochází. Spolu s informací o směru, ze kterého svazek na bezpilotní letadlo (nebo do jeho těsné blízkosti) dopadl, je



možné určit druhý bod, kterým svazek prochází. Tím získáváme přímkou v prostoru, která by měla při průniku se zemským povrchem určit přesné místo, odkud laserové záření přichází.

V praxi by k tomu byl zapotřebí výpočet, jehož představení není součástí této práce. Místo toho je však možné využít výrazné body v obraze v okolí laserového zdroje, který by měl být v obraze dobře patrný. Spolu s využitím laserového dálkoměru, kterým jsou některé snímače vybaveny, je pak možné určit přesnou polohu konkrétního bodu v obraze. Tuto funkci nabízí jako součást ovládacího software například firma DJI u bezpilotních letadel Matrice M30 a M30T a také u větších Matrice M300 RTK a M350 RTK vybavených například kamerou Zenmuse H20, H20T nebo H20N. Funkcionalita se nazývá PinPoint a může ji využít dálkově řídící pilot bezpilotního letadla. Takto zaměřený bod se okamžitě sdílí do software FlightHub 2, pokud se používá pro konkrétní stroj a let. FlightHub 2 je program pro přehled a správu misí prováděných bezpilotními systémy v rámci připojené letky bezpilotních letadel [26]. Tento software může být operován a monitorován například na policejním dispečinku, odkud mohou být na označené místo okamžitě vysláni policisté za účelem nalezení pachatele a zajištění ukončení laserové činnosti. Alternativně může být ke stejnému účelu využít vlastní software nebo software jiného výrobce. Toto je však jediná možnost, s jejíž existencí je autor seznámen.



## 3 Prezentace výsledků

### 3.1 Geometrie zásahu letadla laserovým svazkem

Aby bylo možné určit, jakým způsobem provádět lety pro nalezení útočníka, je nejdříve nutné vyhodnotit, na kterých pozicích se musí nacházet letadlo a útočník, aby byla skutečně ohrožena bezpečnost letu. K tomu je následně přihlédnuto při tvorbě vhodné letové trajektorie bezpilotního letadla. V úvahu je nutné vzít relativní vzdálenosti všech tří subjektů (letadla, útočníka a bezpilotního letadla). Tuto vzájemnou konstelaci autor souhrnně nazval geometrie zásahu letadla laserovým svazkem.

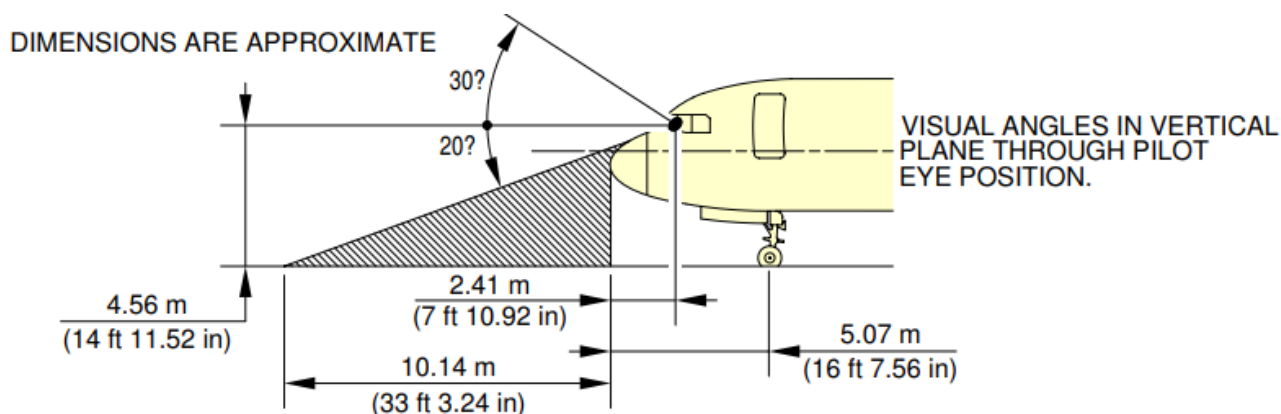
První informací, se kterou je možné pracovat, je pozice letadla v prostoru. Jak bylo zmíněno již dříve, tato práce se věnuje útokům na letadla v konečné fázi přiblížení, tedy na sestupové rovině mezi bodem konečného přiblížení (FAP) a prahem dráhy 24. Pro zjednodušení se za počátek konečného přiblížení a sestupu považuje poloha FAF publikovaná v mapě přístrojového přiblížení za pomoci systému ILS [17]. Předpokládá se tedy, že letadlo se v této části letu bude pohybovat po přesně dané trajektorii publikované v Letecké informační příručce ČR. S tímto předpokladem tedy známe množinu poloh, ve kterých se může letadlo nacházet, včetně výšky letu nad terénem. FAF se nachází na ose dráhy 24 ve vzdálenosti 8,8 NM od prahu dráhy ve výšce 4000 stop nad střední hladinou moře. V tomto bodě dochází k protnutí minimální výšky 4000 stop AMSL, ve které se letadlo může pohybovat od fixu počátečního přiblížení (IAF), s paprskem ILS, který může být použit k navedení a udržení letadla na sestupové rovině, která klesá k prahu dráhy pod úhlem  $3^\circ$ . [17]

Určit polohu útočníka předem není možné. Lze však určit oblasti, kde se vyskytovat nemůže, respektive odkud nebude laserový útok možný, protože svazek nebude schopen dosáhnout do kokpitu. K nalezení těchto prostor jsou použity informace o rozhledových poměrech z kokpitu. V úvahu byly vzaty jen některé typy letadel, které se na daném letišti vyskytují s vysokou četností [27], konkrétně Boeing 737 (všechny verze mají shodné rozhledové poměry), Airbus A320 family a pro doplnění také Airbus A220. Z dokumentace zpracované výrobcem a určené pro plánování letišť lze vyčíst rozhledové poměry z kokpitu v různých směrech. Ty jsou uvedeny v tabulce 3.1 a pro názornost jsou doplněny obrázky 3.1, 3.2 a 3.3 z publikace pro letadlo Airbus A320. Hodnoty v závorkách pro letadlo Boeing B737 platí v případě, kdy pilot vykloní hlavu 13 centimetrů mimo standardní pozici směrem od podélné osy letadla.

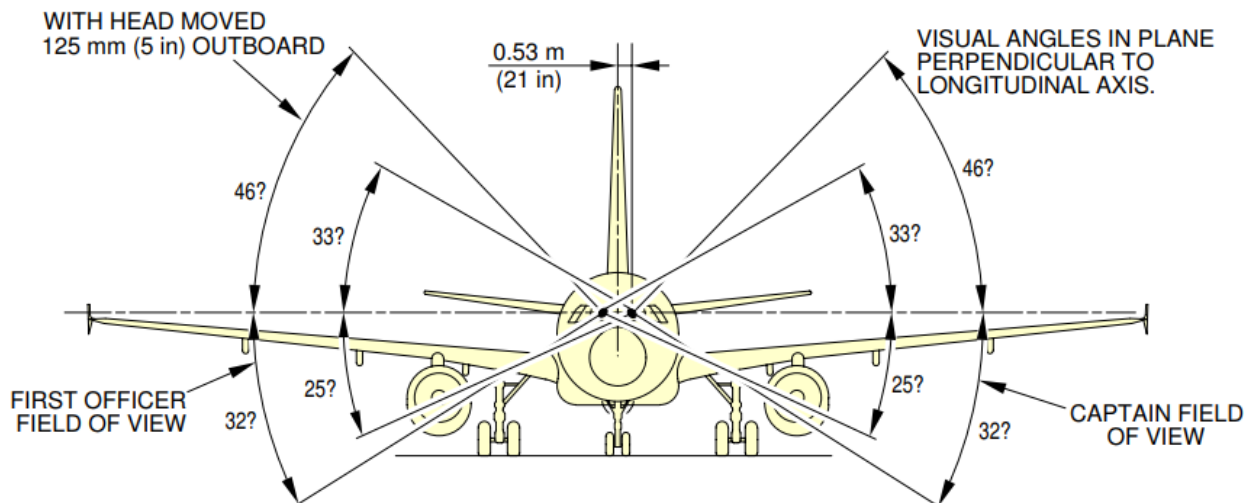
V návaznosti na tabulku 3.1 uvažujme dva základní směry, ze kterých může být útok do kokpitu veden.

Tabulka 3.1: Rozhledové poměry z kokpitů některých typů letadel [28], [29], [30]

Označení modelu letadla	Výhled z kabiny směrem dopředu dolů	Výhled dolů ve směru kolmém k podélné ose letadla	Výhled ve vodorovné rovině od podélné osy letadla
Airbus A220	17°	25°	123°
Airbus A320	20°	25°	133°
Boeing B737	15°	33° (41°)	133° (140°)



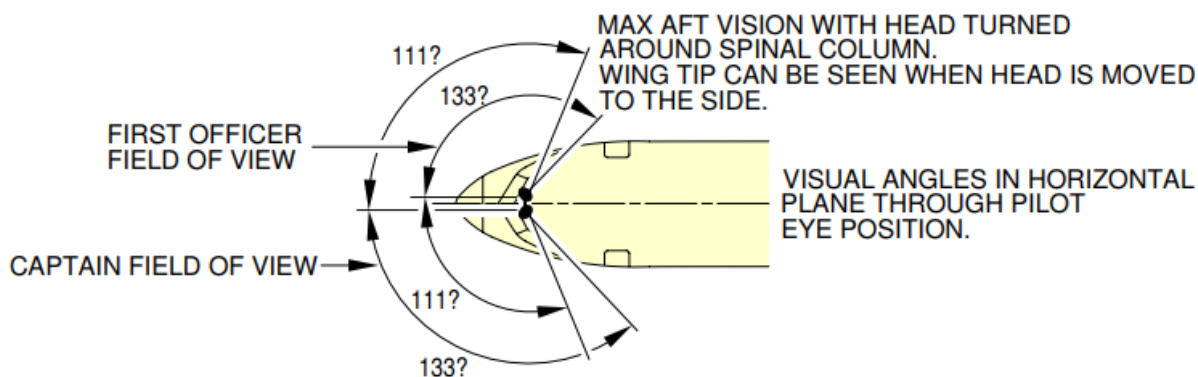
Obrázek 3.1: Výhled z kabiny letounu Airbus A320 směrem dopředu [29].



Obrázek 3.2: Výhled z kabiny letounu A320 ve směru kolmém k podélné ose letadla [29].

### 3.1.1 Útok vedený z prodloužené osy dráhy

Prvním z nich je směr podélné osy letadla, kdy svazek pronikne do kabiny předním oknem. Z výše uvedených dat vidíme, že nejlepší výhled na zem v tomto směru je z letounu Airbus A320, uvažujeme tedy tento případ jako nejhorší možný scénář, se kterým je nutno počítat. Jak vidíme na obrázku 3.1, onen 20° výhled je měřen od podélné osy letadla. Ta nebývá ve fázi konečného přiblížení paralelní se zemí, nýbrž směřuje lehce vzhůru. Jelikož však toto klopení vzhůru nebývá v průběhu



Obrázek 3.3: Výhled z kabiny letounu A320 ve vodorovné rovině od podélné osy letadla [29].

této fáze letu konzistentní a autor nemá k dispozici přesné podklady pro určení polohy podélné osy letadla během konečného přiblížení, bude pro následující výpočty uvažován nejhorší možný scénář podložený dokumentací. Konkrétně jde o abnormální situaci Unreliable speed indication, která je popsána v QRH letounu a která určuje míru podélného sklonu pro klesání na  $8,5^\circ$  nad horizontální rovinu v případě konfigurace, kdy jsou vztlakové klapky vysunuty do pozice 2 [31]. Celkový rozhledový úhel ve směru podélné osy letadla bude tedy  $11,5^\circ$  dolů od horizontální roviny.

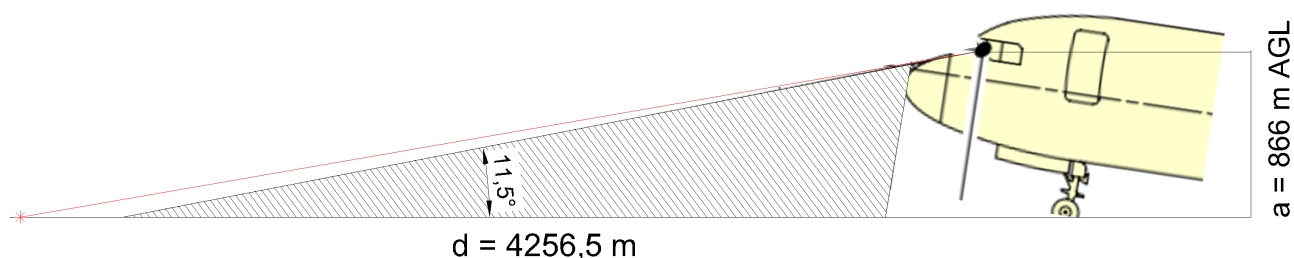
Jak je vidět na obrázcích 3.1 a 3.2, v blízkosti letadla vznikají slepé úhly. Místa na zemi, která se v těchto úhlech nacházejí, není možné z pilotní kabiny vidět, aniž by pilot změnil polohu hlavy. Tento případ nebude uvažován, protože se předpokládá snaha pilotů minimalizovat nebezpečí oslnění laserem. Místa nacházející se ve slepém úhlu jsou pro tuto práci důležitá, neboť útočník nacházející se v těchto oblastech představuje mnohem menší nebezpečí pro letový provoz. Těmto místům tedy nemusí být přikládána taková důležitost a při pátrání po útočnickovi není nutné se na ně příliš soustředit.

Případ útoku přicházejícího ze směru letu je znázorněn na obrázku 3.4. Letadlo se zde nachází ve výšce 4000 stop AMSL, která odpovídá výšce letu na úrovni FAF. Pokud by útok přišel pod úhlem větším než  $11,5^\circ$ , nedosáhne do kokpitu, nýbrž osvítí pouze radom. Uvažovaná výška odpovídá 866 metrům na prahem dráhy. Při předpokladu vodorovného zemského povrchu lze pomocí goniometrické funkce tangens dopočítat minimální horizontální vzdálenost útočníka od letadla, aby byl schopen provést útok. Její výpočet je zapsán v rovnici 3.1.

$$\tan 11,5^\circ = \frac{a}{d} \implies d = \frac{866 \text{ m}}{\tan 11,5^\circ} = 4256,5 \text{ m}, \quad (3.1)$$

kde  $d$  je minimální horizontální vzdálenost útočníka od letadla na úrovni FAF při čelním útoku v m a  $a$  je výška letu letadla nad prahem dráhy v m.





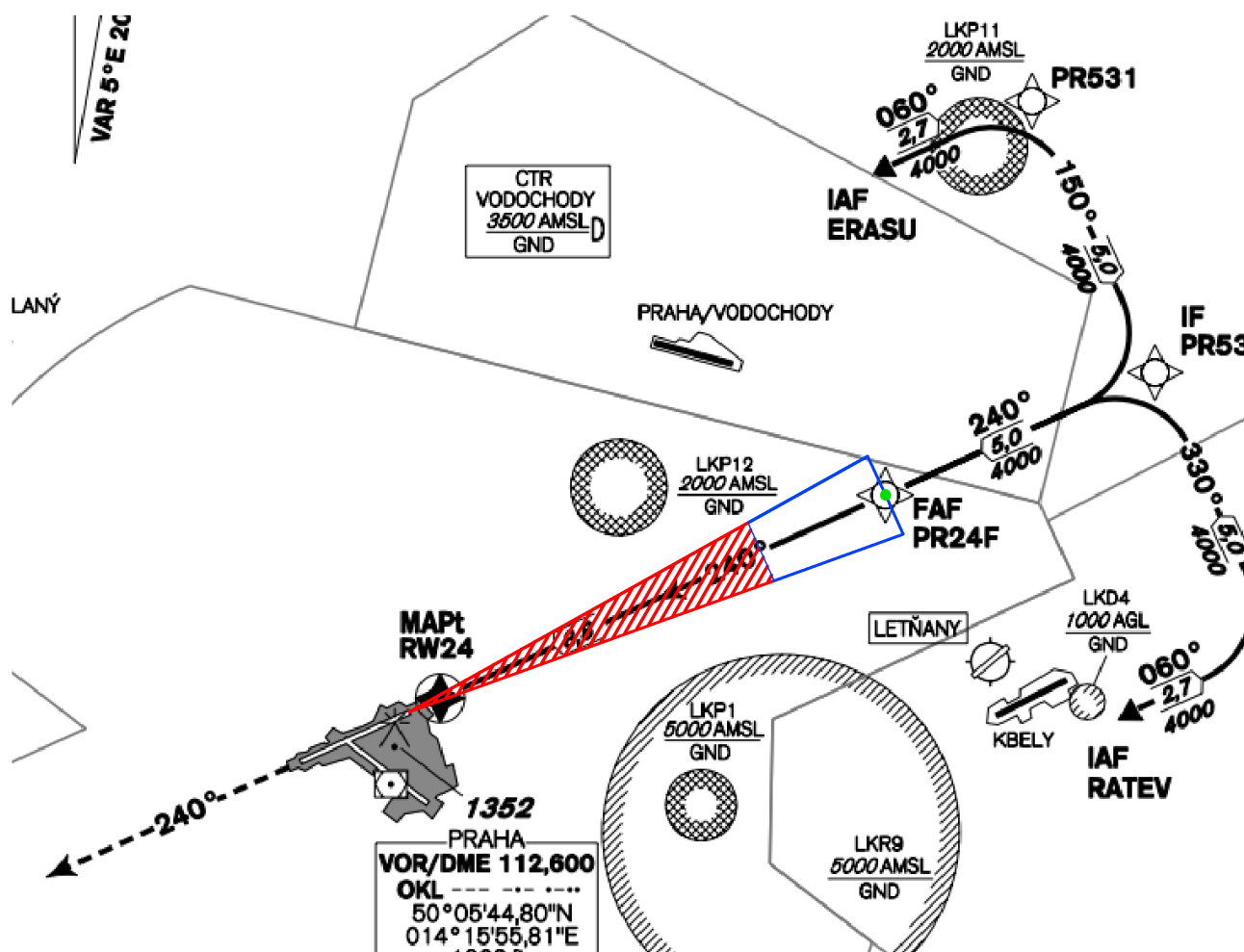
Obrázek 3.4: Slepý úhel a minimální vzdálenost útočníka při čelním útoku na letadlo na úrovni FAF [29].

Z výpočtu plyne minimální vodorovná vzdálenost, ve které se musí útočník nacházet před letadlem na zemském povrchu, aby byl schopen zasáhnout kokpit. To platí pro výšku letu na úrovni FAF. S klesající výškou letu však klesá i tato vzdálenost. Například ve vzdálenosti 4 NM od prahu dráhy by útočníkovi stačila horizontální vzdálenost 1892 metrů, neboť letadlo se nachází pouhých 384 metrů nad prahem dráhy. Je možné předpokládat, že útočník se nepokusí překonat perimetr letiště, aby tím zvýšil šanci úspěšného zásahu tím, že se posune blíže k prahu dráhy. Oplocení areálu letiště se nachází asi 500 metrů od prahu dráhy. Zde se však již letadlo nachází v tak malé výšce, že pro útočníka stojícího u plotu bude možné zasáhnout letadlo i z velmi malé vzdálenosti. Za bezpečnou považujeme tedy až situaci, kdy letadlo přeletí oplocení letištních pozemků. Od tohoto okamžiku se již nepředpokládá zásah kokpitu svazkem.

Na obrázcích 3.5 a 3.6 jsou pro ilustraci uvedeny dva případy. Poloha letounu je zde znázorněna zelenými body. V bezprostřední blízkosti před letounem se nachází modrá zóna, z níž nemůže být na letadlo veden útok, protože by laserový svazek nedosáhl kokpitu, jak je popsáno v předešlých odstavcích. Červeně šrafovaná zóna znázorňuje oblast, odkud lze efektivně vést útok na letadlo, pokud se zde bude útočník nacházet.

Šířka všech zón zakreslených v ilustracích 3.5 a 3.6 vychází pouze z šířky bezpečnostního pásma, ze kterého nelze zasáhnout kokpit při útoku ze strany pod úhlem  $90^\circ$  k ose dráhy, což je popsáno dále. Samotná šířka zde není relevantní, protože se uvažuje pouze případ, kdy se útočník nachází přímo v ose dráhy, respektive ve směru podélné osy letounu, jejichž směry se v této práci považují za shodné. Pro plnohodnotnou analýzu útoků přicházejících ze směrů jiných, než je podélná osa letounu a směr k ní kolmý, nemá autor k dispozici dostatečné množství podkladů.

Z těchto ilustrací lze odvozovat, že z pohledu útočníka je pro útok ve směru letu nejvhodnější pozicí místo co nejvzdálenější od FAF, odkud je stále možné zasáhnout interiér kokpitu a vést tento útok po

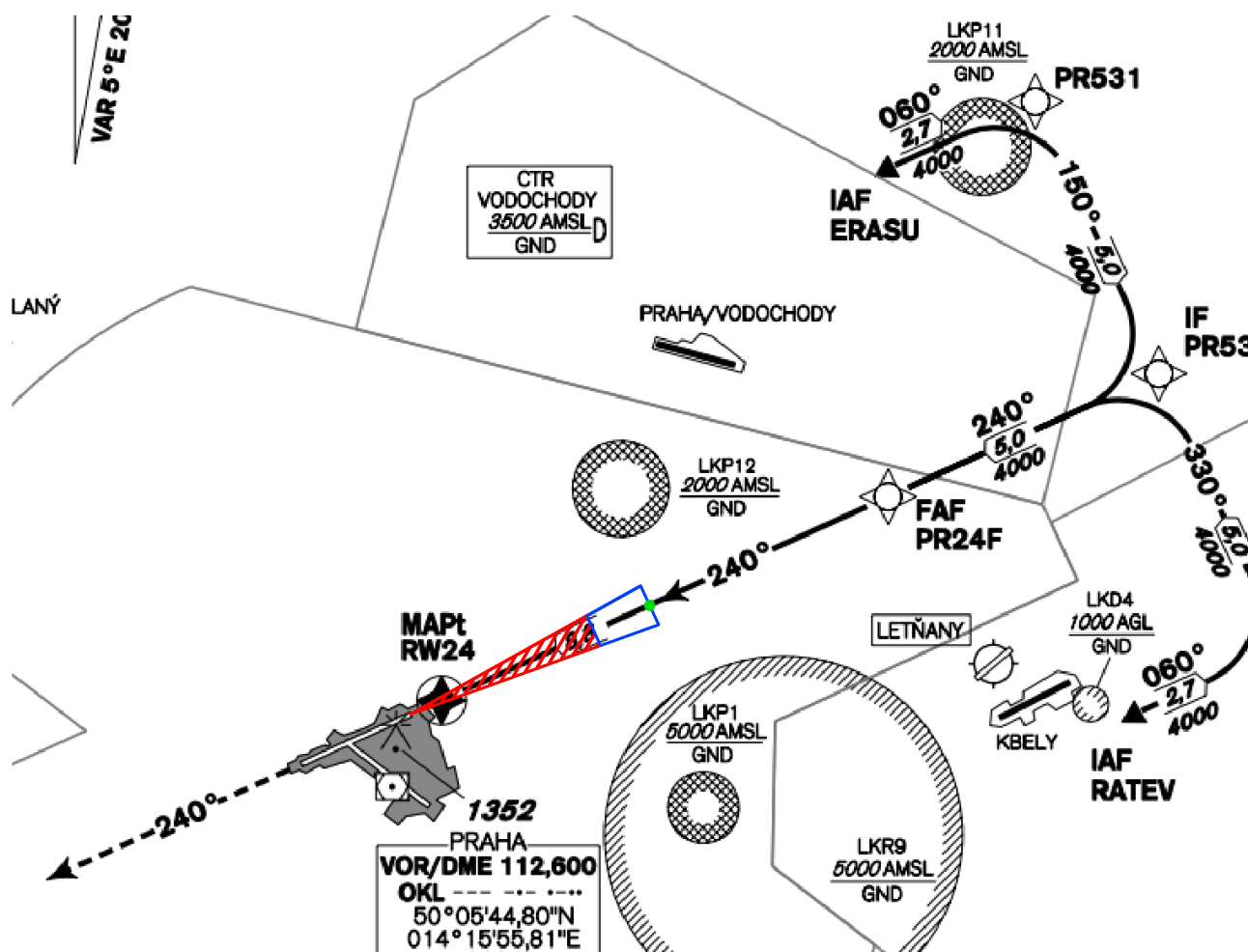


Obrázek 3.5: Zóny, odkud může (červeně) a nemůže (modře) být zasažen kokpit letounu ze směru letu, nachází-li se na úrovni FAF (zelený bod) [32].

nejdelší možnou dobu. Do této oblasti by tedy měly být směřovány i vyhledávací aktivity, pokud bude nahlášen útok ze směru letu.

### 3.1.2 Útok vedený ze směru kolmého na podélnou osu letadla

Druhým uvažovaným případem je situace, kdy svazek pronikne do kokpitu bočním oknem pod úhlem 90° sevřeným s podélnou osou letadla. Pro tento případ je nejvíce vypovídající obrázek 3.2. V tomto směru je nejnáchylnějším typem Boeing 737, budeme tedy uvažovat případ útoku na toto letadlo. Jak je patrné z obrázku 3.2, přímo pod letadlem vzniká slepý úhel, jak tomu bylo i v předchozím případě. Pokud tento slepý úhel promítneme podél sestupové roviny a vezmeme-li v potaz klesající výšku letu s klesající vzdáleností letadla od letiště, dostaneme zónu, ze které hrozí minimální nebezpečí zasažení letové posádky laserem z tohoto směru a na tuto oblast se tedy nebude zbytek práce primárně soustředit. Její šířku na zemském povrchu s ohledem na výšku letu lze vypočítat podle rovnice 3.2.

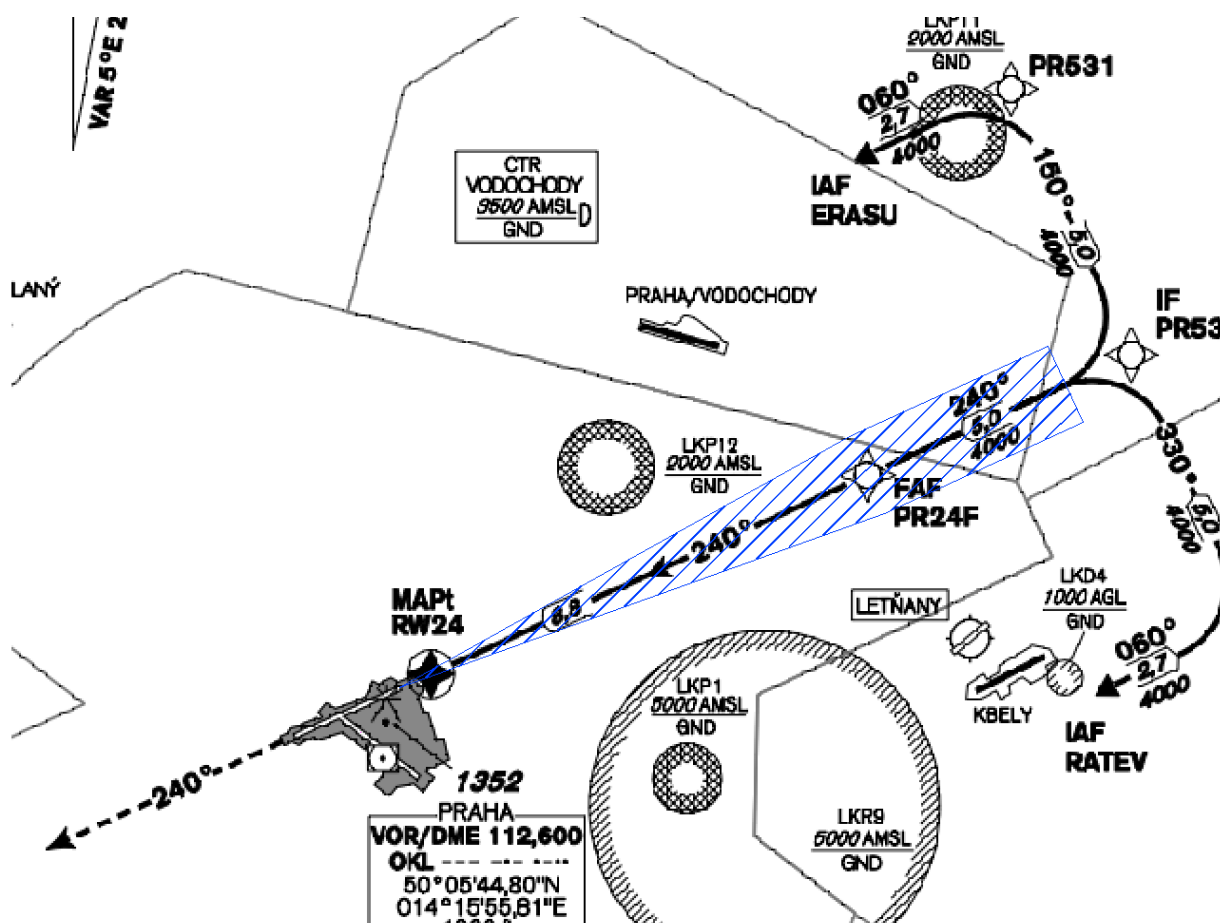


Obrázek 3.6: Zóny, odkud může (červeně) a nemůže (modře) být zasažen kokpit letounu ze směru letu, nachází-li se ve vzdálenosti 4 NM od prahu dráhy (zelený bod) [32].

$$d = 2 \cdot \tan(90^\circ - \alpha) \cdot h, \quad (3.2)$$

kde  $d$  je šířka pásma se středem shodným s polohou letadla, ze kterého není letadlo ohroženo laserovým útokem v m,  $\alpha$  je rozhledový úhel z kokpitu měřený od horizontální roviny ve stupních a  $h$  je vertikální vzdálenost mezi útočníkem a letadlem v m.

Podle tohoto vzorce by letadlo letící ve výšce 4000 stop nad střední hladinou moře, tedy asi 866 metrů nad terénem (pro zjednodušení se opět uvažuje plochý terén s nadmořskou výškou rovnou nadmořské výšce prahu dráhy), mohlo být zasaženo pouze útočníkem, který by se nacházel v kolmé vzdálenosti od osy letadla nejméně 1334 metrů. Jakmile bude letadlo klesat pod tuto výšku, bude klesat také minimální vzdálenost nutná pro zasažení kokpitu laserem. Tento výpočet zanedbává rozměry letadla a výšku umístění zdroje laserového záření nad zemí, která nemusí odpovídat nadmořské výšce terénu. Bezpečný koridor, ve kterém nehrozí útok ze strany, je vyznačen modrou barvou v obrázku 3.7. V něm se předpokládá, že mezi IF a FAF poletí letadlo v nejnižší možné výšce, tedy ve 4000 stop AMSL.



Obrázek 3.7: Koridor, uvnitř něhož nemá laserové záření možnost zasáhnout interiér kokpitu při útoku ze strany [32].

S informacemi z této podkapitoly lze doplnit výklad obrázků 3.5 a 3.6. Modrá zóna umístěná nejbližší k letadlu zde představuje prostor, ze kterého nelze zasáhnout piloty v kokpitu laserovým svazkem ani při čelním ani bočním útoku. Tato část je průnikem bezpečných zón při útocích zepředu a ze strany. Její poloha se s průběhem letu posouvá směrem k RWY a zužuje se podle průběhu bezpečné zóny na obrázku 3.7. Její délka ve směru od letadla se také postupně zkracuje, jak popisuje parametr  $d$  z rovnice 3.1. Červená zóna znázorňuje oblast, odkud je možné zasáhnout prostor kokpitu čelním, nikoli však bočním útokem. Tato zóna se postupně zkracuje, jak se letadlo přibližuje k prahu dráhy.

Je pravděpodobné, že útočník se bude snažit minimalizovat svou vzdálenost od prodloužené osy dráhy, protože na kratší vzdálenost může být jednodušší namířit laserový svazek požadovaným směrem a intenzita v místě dopadu roste s klesající vzdáleností, neboť dochází k menšímu rozptylu na částicích v atmosféře. Tento rozptyl se dá kompenzovat vyšším výkonem laserového zdroje, avšak zákonné limity pro maximální výkony laserů pro civilní použití jsou poměrně striktní, případ vyššího než legálně povoleného výkonu tedy tato práce neuvažuje. Dále, čím blíže je cíl (letadlo) zdroji laserového zařízení, tím lépe je laserový svazek zaostřen na menší plochu, což je dáno rozbíhavostí



svazku. Z předchozích podkapitol také víme, že z pohledu vzdálenosti od letiště je pro útočníka vhodné být co nejbližší prahu dráhy, aby mohl útok probíhat co nejdéle. Na základě těchto dvou poznatků by se tedy vyhledávání útočníka mělo soustředit primárně na okrajové části slepé zóny v blízkosti prahu dráhy, přibližně od čtvrté námořní míle konečného přiblížení. To samozřejmě platí pouze v případě, kdy není k dispozici informace alespoň o přibližné poloze útočníka. Pokud je tato informace k dispozici, například od posádky zasaženého letadla, bude se vyhledávání zaměřovat na udanou oblast.

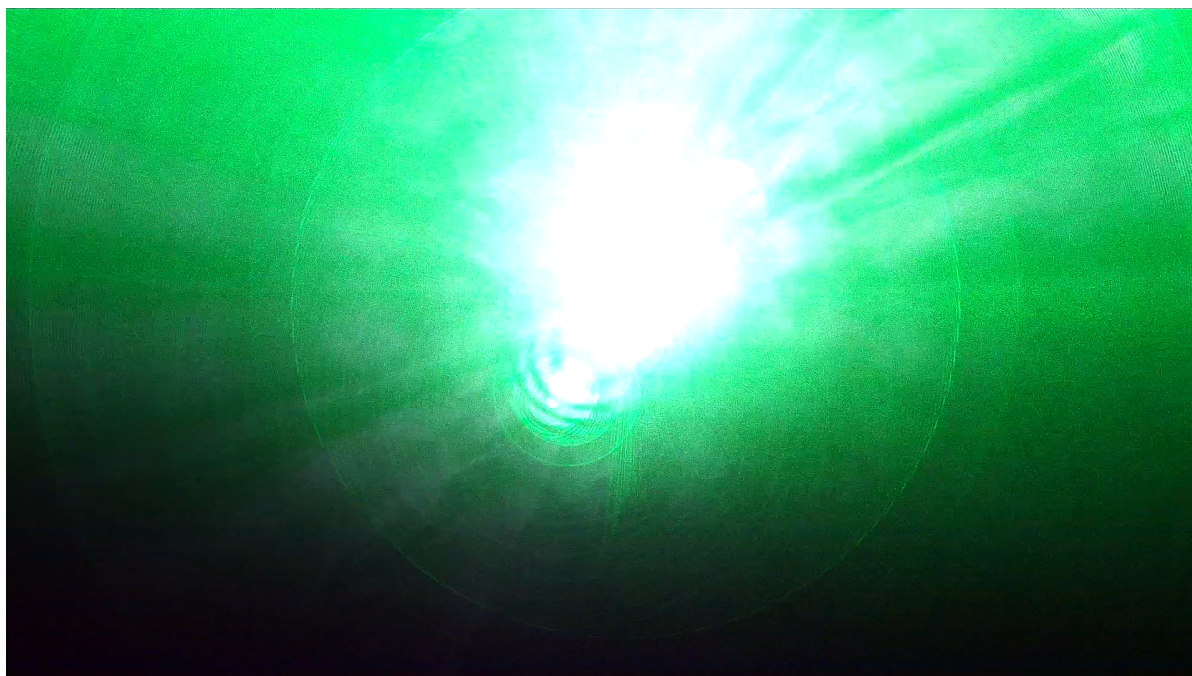
### 3.2 Experimenty s detekcí

Společné experimenty UNOB, VUT a ČVUT přinesly několik poznatků. Pokud je snímač přímo zasažen laserovým svazkem, projevuje se tento zásah v záznamu interferenčními obrazci, které jsou velmi jasné a viditelné na poměrně velké části zorného pole kamery, jako je tomu například na obrázku 3.8. Přímého zasažení snímače však nebylo snadné dosáhnout a pokud k němu došlo, jednalo se většinou pouze o krátký záblesk. I ten byl však dostatečný k jednoznačnému určení polohy zdroje záření v rámci zorného pole snímače. Dále bylo možné pozorovat přímou viditelnost laserového svazku, pokud se bezpilotní letadlo nacházelo v dostatečné blízkosti svazku, v tomto případě přibližně 180 metrů od pozice, na které došlo k přímému zásahu snímače. Tento případ je dobře patrný na obrázku 3.9. Nutno však přihlídnout k omezené přesnosti systému GNSS používanému k zaměření těchto poloh a k hodnotám jednotlivých souřadnic, které byly zaznamenávány s přesností na desetitisíciny stupně. Ve větších vzdálenostech od laserového svazku, ať už vertikálních či horizontálních, byl zdroj laserového záření patrný jako malý světelný bod, viz obrázek 3.10, jehož velikost se snižovala se zvětšující se vzdáleností kamery od zdroje. Všechny výše zmíněné projevy laserové aktivity zaznamenané digitální kamerou byly dobře patrné bez ohledu na to, v které části zorného pole snímače se nacházely, jak si lze všimnout při porovnání obrázků 3.9 a 3.11.

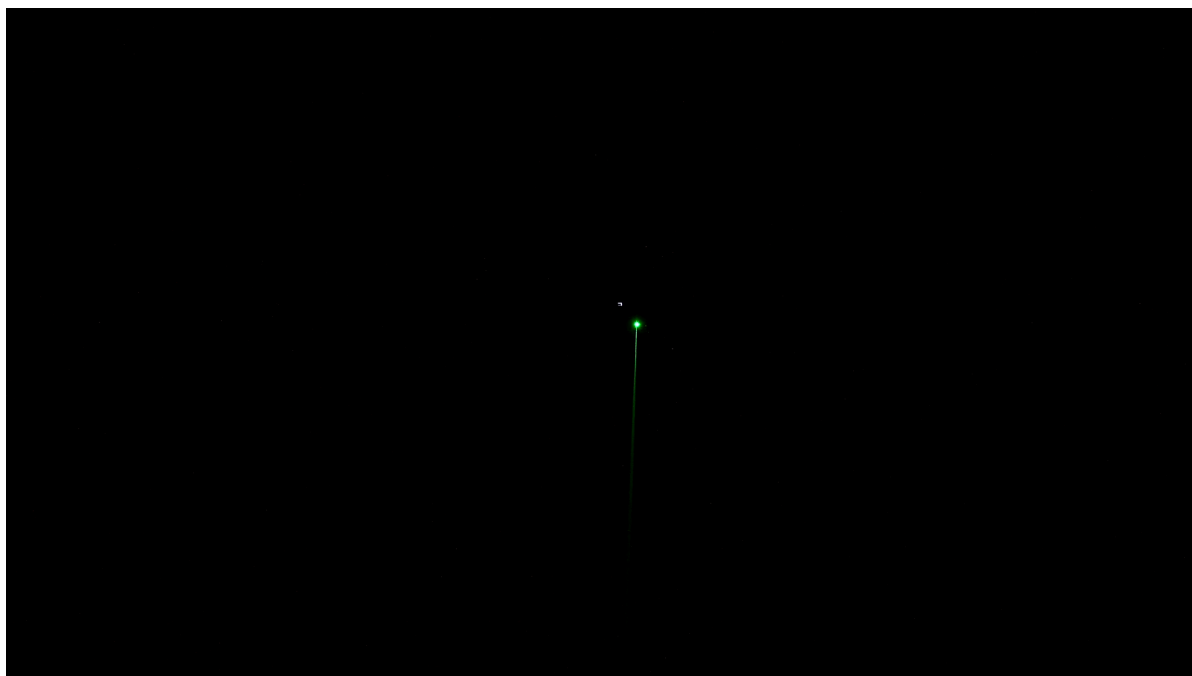
### 3.3 Konzultace s odborníkem na ATM

Celý navrhovaný systém byl konzultován s panem Stanislavem Schmidtem, odborníkem na řízení letového provozu, který má praktické zkušenosti s řízením a managementem letového provozu ze stanoviště approach letiště Václava Havla v Praze.

Podle něj je, z pohledu pravidel létání i postupů ŘLP, navrhovaný provoz uvnitř CTR možný. Na provoz bezpilotního letadla se v tomto případě aplikují stejná pravidla řízení jako na provoz VFR, nezajišťují se mu tedy rozstupy od okolního provozu. ATCO však musí mít dostatek informací, aby mohl zabraňovat srážkám. Toho lze dosáhnout odpovídáčem sekundárního radaru na palubě.

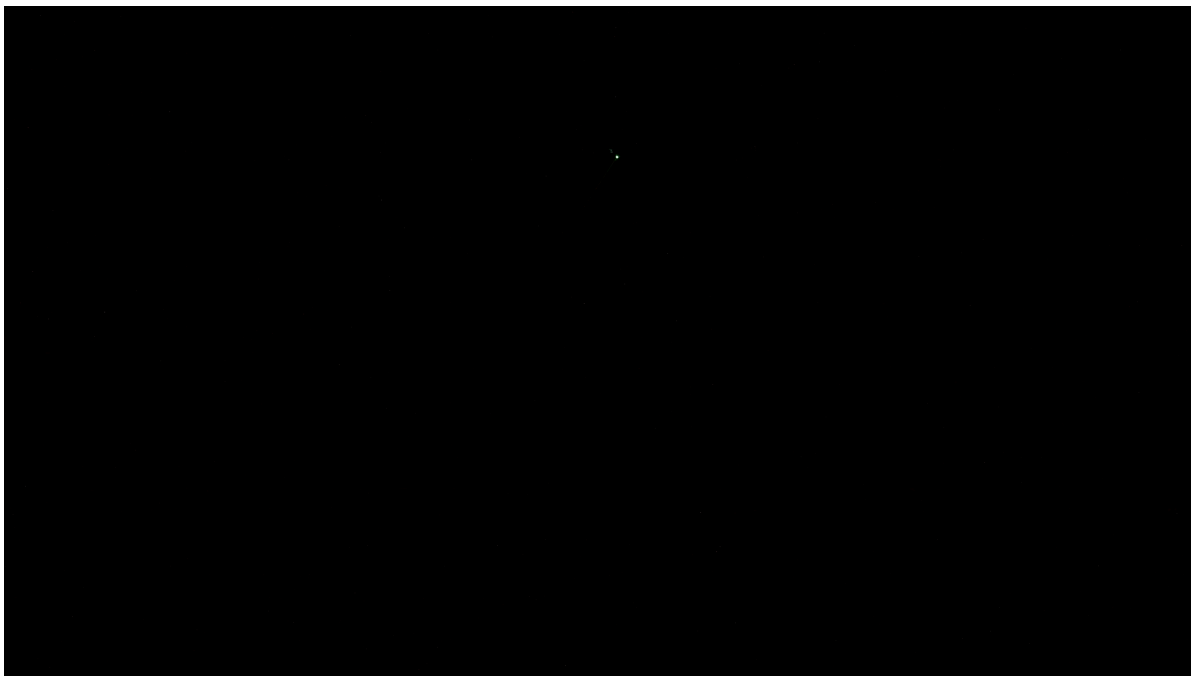


Obrázek 3.8: Snímek pořízený kamerou bezpilotního letadla při přímém zásahu laserovým svazkem.



Obrázek 3.9: Viditelný zdroj i svazek laserového záření.

Požadavek na provoz bezpilotního letadla je, aby během něj nedošlo k nebezpečnému snížení vzdálenosti od okolního provozu nebo k narušení osy dráhy. Vzdálenost od osy stejně jako prostor, ve kterém bude bezpilotnímu letadla povolen pohyb, však závisí na každém ATCO, konkrétní požadavky nejsou stanoveny.



Obrázek 3.10: Viditelný zdroj při větší vzdálenosti snímače od laserového svazku.



Obrázek 3.11: Viditelný svazek se zdrojem mimo střed zorného pole snímače.

Zkušenosti, které mají pracovníci Řízení letového provozu s aktuální metodou vyhledávání zdrojů laserových útoků policejním vrtulníkem, jsou podle pana Schmidta velmi dobré a policejní piloti mají u ATCO velkou důvěru, mimo jiné, pokud jde o provoz v blízkosti jiných letadel. Pan Schmidt se tedy domnívá, že pokud by bylo i bezpilotní letadlo operováno Policíí, ATCO by povolili let i v oblastech a výškách, kam by běžnému bezpilotnímu provozu dnes nebyl umožněn přístup ani po předchozí koordinaci. Vyšší důvěře ATCO v tento provoz by podle něj přispěla také společná koordinace



ŘLP s provozovatelem tohoto bezpilotního systému již ve fázi plánování implementace. Pokud bude ATCO vědět, jak provoz probíhá, jaké situace může očekávat a jaká opatření jsou k dispozici pro řešení různých situací včetně těch nestandardních, bude dostatečně komfortní s menší vzdáleností tohoto a okolního provozu. To je v konečném důsledku žádoucí pro maximalizaci pravděpodobnosti úspěšného splnění vyhledávací mise.

Jediný potenciálně problematický provoz, který dokázal pan Schmidt v navrhovaném systému identifikovat, jsou lety policie, letecké záchranné služby nebo lety SAR, které by se mohly pohybovat ve stejných prostorech a výškách jako bezpilotní letadlo pracující na vyhledávání útočníka. Byla konstatována nesporná potřeba dát přednost v letu těmto letům před vyhledávací misí. Společnou konzultací s autorem se však došlo k závěru, že takováto situace má jednoduché řešení ve formě podání informace o provozu oběma dotčeným letům, převzetí kontroly na bezpilotním letadlem dálkově řídicím pilotem a okamžité snížení výšky jeho letu, případně přesunu na bezpečnou pozici podle doporučeného kurzu pro vyhnutí od ATCO nebo, pokud by to okolní terén a podmínky umožňovaly a vyžadovaly, mohlo by být provedeno přistání do terénu. Ani tato situace tedy nemusí být překážkou pro plánování a provedení pátracích letů bezpilotního letadla.

### **3.4 Databáze několika letových scénářů v závislosti na poloze útočníka**

Laserový útok může být proveden na letadlo v kterékoli fázi letu při použití kterékoli RWY. Je tedy vhodné mít připravené scénáře pro všechny tyto možné situace, alespoň podél všech tratí konečného přiblížení, neboť zde se let nachází v kritické fázi a laserový útok na něj může mít největší negativní dopad. V této kapitole budou tedy navrženy scénáře letu bezpilotního letadla vyhledávajícího útočníka na Letišti Václava Havla Praha s ohledem na různé směry a vzdálenosti, ze kterých piloti udají, že útoky přicházejí. Zpracovány budou lety přistávající na RWY 24, aplikace na ostatní RWY je analogická, pouze s přihlédnutím ke konkrétnímu vzdušnému prostoru, geografickým podmínkám a oblastem, kde se nejběžněji vyskytuje letový provoz.

Jelikož tato práce slouží především k představení konceptu, nikoli k přímé implementaci do praxe, umístění zde navržených trajektorií je spíše ilustrační a nevychází z detailní analýzy vzdušného prostoru, výskytu provozu ani dalších specifik, které mohou mít vliv na konečnou volbu trajektorií těchto letů. Zváženy však byly rozhledové poměry z letadel a proveditelnost úspěšného laserového útoku.

Navrhovaná horizontální vzdálenost bezpilotního letadla od osy dráhy je 200 metrů. Tato vzdálenost je dostatečně malá k tomu, aby bylo možné přehlednout co největší zájmové území, zároveň je však





dostatečně velká, aby poskytovala bezpečný odstup od přistávajících letadel. Při přistání největšího letadla, jaké kdy bylo na tomto letišti odbaveno – Antonovu An-225 – by mezi bezpilotním letadlem a koncem křídla byla mezera o horizontální délce 156 metrů. Navíc se bude bezpilotní letadlo pohybovat v nižší výšce než paralelně letící provoz, konkrétně o 130 metrů, což je možno vypočíst pomocí rovnice 3.3, která představuje vztah výšky letu nad terénem a horizontální vzdálenosti od zdroje laserového svazku pro bezpilotní systém a letadlo s posádkou na sestupové rovině. Graficky je tato situace vyobrazena na obrázku 2.5

$$\tan \alpha = \frac{h_D}{d_D} = \frac{h_L}{d_L}, \quad (3.3)$$

kde  $\alpha$  je úhel sevřený mezi vodorovnou rovinou a laserovým svazkem mířícím do kokpitu letadla ve stupních,  $h_D$  je výška letu bezpilotního systému nad terénem v m,  $d_D$  představuje horizontální vzdálenost bezpilotního letadla a zdroje laserového svazku v m, dále  $h_L$  symbolizuje výšku letu letadla nad terénem v m a  $d_L$  je horizontální vzdálenost letadla od zdroje laserového svazku.

Pro stanovení vzdálenosti bezpilotního systému od přistávajících letadel by mohly být uvažovány ochranné prostory přesného přístrojového přiblížení. Tyto jsou však definovány pro výšky nižší, než v jakých se letadla pohybují. Tato práce však předpokládá, že v určité fázi vyhledávací mise dojde k situaci, kdy se bude bezpilotní systém nacházet ve větší výšce než samotné letadlo, ochranná pásma tedy nejsou zcela relevantní.

Budeme-li vycházet z hodnot uvedených v gridu (obrázek 2.4), které jsou založeny na ochranných prostorech letiště, pak lze předpokládat, že v oblastech ležících přímo v ose dráhy a vně těchto ochranných prostorů, ve kterých je maximální povolená výška letu bezpilotních systémů nenulová, se předpokládá, že bezpilotní letadlo pohybující se v této oblasti bude v bezpečné vertikální vzdálenosti od ostatního leteckého provozu pohybujícího se přímo nad ním po sestupové rovině publikovaného postupu pro přiblížení na přistání. Například obdélník označený Grid ID10738, který leží v ose dráhy 30, umožňuje let bezpilotních letadel do výšky 20 m nad terénem. Dráha 30 byla pro tento příklad vybrána z důvodu menší členitosti terénu v její ose. Výška terénu je zde 1119 ft nad střední hladinou moře [16]. Letadla přistávající na RWY 30 vedená systémem ILS se v tomto místě nacházejí ve výšce 1604 ft [33]. Vertikální vzdálenost mezi letadlem a bezpilotním letadlem považovaná podle gridu za bezpečnou je 485 ft, tedy 147,8 m. Pokud by měla být tato vertikální vzdálenost zachována pro všechny lety navrhované v této práci, měla by být, podle rovnice 3.3, horizontální vzdálenost bezpilotního letadla od osy dráhy alespoň 227,6 metru. V případě gridu je však vertikální vzdálenost obou letadel zároveň vzdáleností absolutní. V případě, že by těchto 147,8 metrů, považovaných zde za precedens bezpečné vzdálenosti, znamenalo bezpečnou absolutní vzdálenost, je tento požadavek

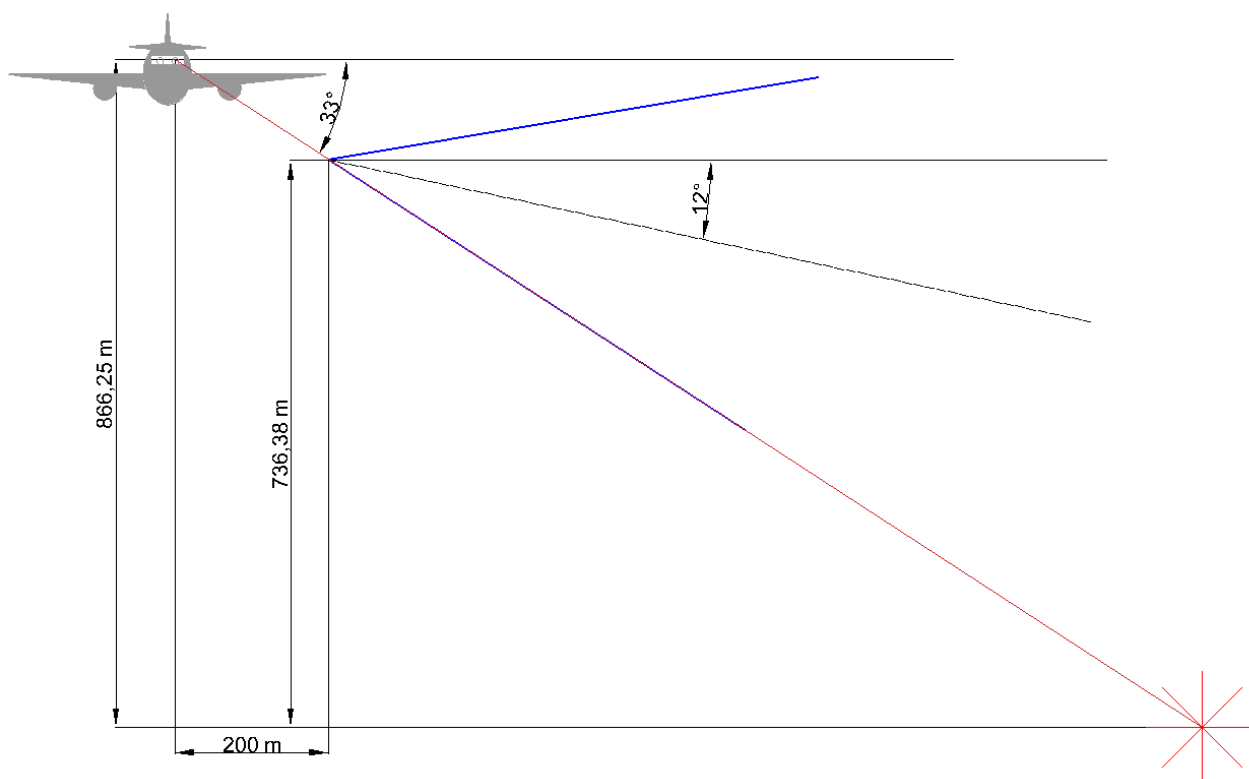


splněn i při navrhovaném odstupu od osy dráhy 200 metrů.

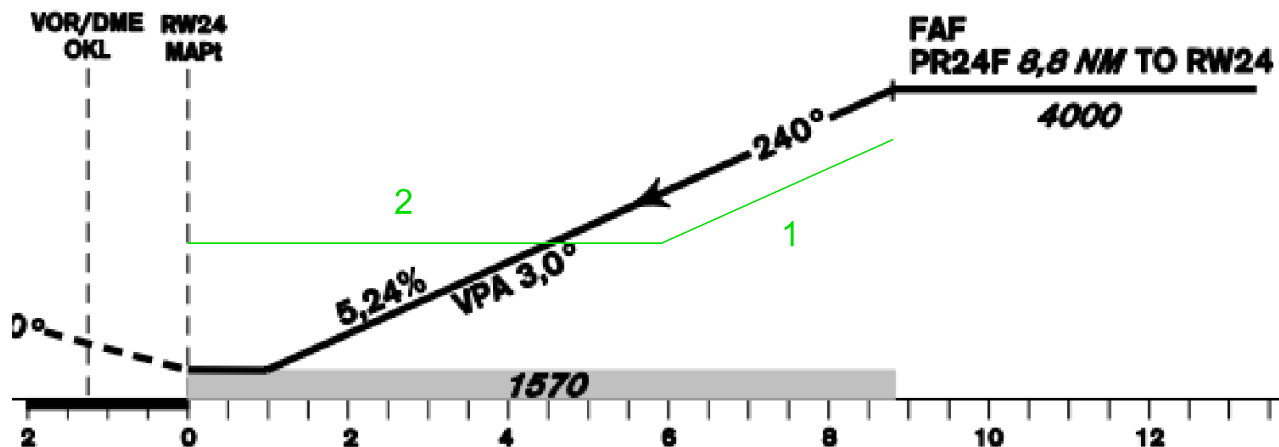
První fáze detekční mise je znázorněna na obrázku 3.12, kde červeně je vyobrazen zdroj laserového záření s laserovým svazkem mířícím do kokpitu a modře je vymezen zorný úhel detekční kamery, jehož osa míří  $12^\circ$  pod vodorovnou rovinu. Poloha bezpilotního letadla je v místě, kde se sbíhají modré úsečky vymezující zorný úhel kamery, silueta bezpilotního letadla byla pro přehlednost vynechána. Této fázi odpovídá také trajektorie označená číslem 1 v obrázku 3.13. Trajektorie nebude začínat na úrovni FAF, neboť podle výše zmíněných parametrů by se zde bezpilotní letadlo nacházelo ve výšce 3575 stop AMSL. Horní hranice CTR Ruzyně, ve kterém bude provoz převážně probíhat, je však pouhých 3500 stop AMSL. Pro jednoduchost je žádoucí, aby provoz probíhal uvnitř jednoho vzdušného prostoru. Toho se docílí zkrácením letové trajektorie, která bude začínat o 0,24 NM blíže k letišti, než je úroveň FAF. Tato vzdálenost spolu s vertikálním vedením popsaným níže zajistí, že nedojde k překročení výšky 3500 stop AMSL a provoz setrvá po celou dobu v CTR Ruzyně.

Z pohledu členění vzdušného prostoru v blízkosti navrhovaného provozu je vhodné zmínit přítomnost CTR Vodochody přiléhající na CTR Ruzyně severovýchodně od LKPR v těsné blízkosti FAF. Bepilotní letadlo se však bude vždy nacházet mezi FAF a LKPR, k překročení FAF tedy nedojde a tím nedojde ani ke vstupu do CTR Vodochody. To může být dále softwarově ošetřeno pomocí funkce geofencing nebo podobné.

Od FAF se bude bezpilotní systém pohybovat směrem k letišti. Aby byla zachována dostatečně velká plocha uvnitř zorného pole snímače, bezpilotní letadlo přestane snižovat svou výšku v okamžiku, kdy dosáhne výšky 2579 ft AMSL a dále bude pokračovat v konstantní výšce. Tomu odpovídá část trajektorie na obrázku 3.13 označená číslem 2. Tato výška je polovinou mezi nejmenší povolenou výškou letu na úrovni FAF a nadmořskou výškovou prahu dráhy [17]. I v momentě, kdy se bude bezpilotní letadlo nacházet ve shodné výšce jako sestupová rovina v dané úrovni, bude zachována dostatečná vzdálenost stanovená precedentně hodnotami gridu, jak bylo popsáno výše. Aby však nebyla opomenuta stále se zužující bezpečná zóna pod osou dráhy, v momentě přechodu do vodorovného letu dojde také k orientaci kamery směrem dolů tak, aby po zbytek letu nebylo nutné natočení kamery měnit a bylo zajištěno prohlédnutí celého zájmového území. To je popsáno v následujících odstavcích a zobrazeno na obrázku 3.14. Výška, ve které dojde k zastavení klesání, nebyla určena na základě konkrétních kritérií a může být předmětem změny. Následující výpočty lze aplikovat obecně pro jakoukoli výšku.



Obrázek 3.12: Parametry detekčního letu v první fázi - se změnou výšky letu.



Obrázek 3.13: Pohled na vertikální trajektorii bezpilotního letadla [32].

Do této chvíle bude kamera směřovat minimálně  $12^\circ$  pod horizontální rovinu. Tento úhel spolu s polovinou vertikálního zorného úhlu kamery, tedy  $21^\circ$ , zajišťuje, že dolní okraj zorného pole kamery míří  $33^\circ$  pod vodorovnou rovinu, což je největší úhel, pod kterým může laser dopadat do kokpitu. S takto naklopeným snímačem bude tedy v první fázi mise vždy vidět okraj bezpečné zóny. Aby se předešlo nepřesnostem a tato viditelnost byla zaručena, je možno tento úhel dále zvýšit z  $12^\circ$  například na  $15^\circ$ . V momentě, kdy dojde k zastavení klesání, bude nutné naklopit snímač do takové polohy, aby zorné pole pokrylo celou oblast až k ose dráhy, kde je teoreticky nulová vzdálenost mezi



letovou trať a okrajem bezpečné zóny. Bezpilotní letadlo se bude nacházet ve výšce 1421 stop (433 metrů) nad úrovní prahu dráhy a v horizontální vzdálenosti stále 200 metrů od osy dráhy (obrázek 3.14). Podle goniometrické funkce tangens tak lze určit úhel od bezpilotního letadla k ose dráhy, což vymezuje plochu, kterou bude teoreticky nutné kontrolovat. Tento úhel lze popsat jako úhel sevřený mezi svislicí vedenou od bezpilotního letadla a kolmicí na osu dráhy procházející polohou bezpilotního letadla a jeho výpočet je uveden v rovnici 3.4.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{d}{h_D} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{200 \text{ m}}{433 \text{ m}} \right) = 25^\circ, \quad (3.4)$$

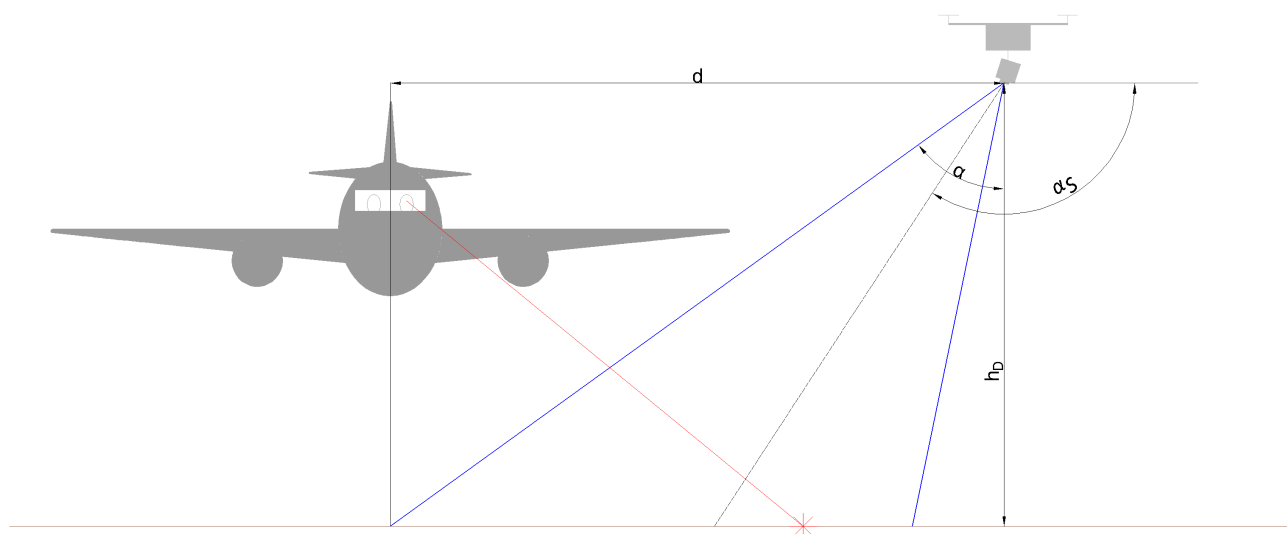
kde  $\alpha$  je úhel sevřený mezi svislicí vedenou od bezpilotního letadla a kolmicí na osu dráhy procházející polohou bezpilotního letadla ve stupních,  $d$  je horizontální vzdálenost bezpilotního letadla od osy dráhy v m a  $h_D$  je výška letu bezpilotního letadla nad prahem dráhy v m.

Od vodorovného směru, ve kterém bude kamera bezpilotního letadla naklopena ve výchozím stavu, je tento úhel vzdálen o dalších  $90^\circ$ , které je nutné k výsledné hodnotě přičíst. Následně lze odečíst polovinu zorného úhlu snímače ve svislém směru, tedy  $21^\circ$ . Tímto postupem vypočteme úhel, o který musí být kamera naklopena při konstantní výšce letu a vzdálenosti od osy dráhy, aby k této ose dosáhlo pokrytí obrazu (rovnice 3.5).

$$\alpha_S = \alpha + 90^\circ - \frac{FOV_V}{2} = 25^\circ + 90^\circ - \frac{42^\circ}{2} = 94^\circ, \quad (3.5)$$

kde  $\alpha_S$  je úhel naklopení snímače od vodorovné roviny potřebný pro pokrytí oblasti v okolí osy dráhy v druhé polovině letové mise ve stupních,  $\alpha$  je úhel dopočtený v rovnici 3.4 ve stupních a  $FOV_V$  je zorný úhel snímače ve vertikální rovině ve stupních.

Schematicky je tato situace vyobrazena na obrázku 3.14. Nevýhodou naklopení kamery o více než  $90^\circ$  od horizontální roviny je reverze obrazu, který se bude jevit, lidově řečeno, „vzhůru nohama“. Pro úhly blízké hodnotě  $90^\circ$  nejde o velký problém, protože obraz bude stále velmi podobný situaci, jako by byl snímán kolmo k zemskému povrchu a k výraznému zkreslení by nemělo dojít. Pokud by však bylo nutné detailně prohledávat prostor v blízkosti prodloužené osy dráhy, například kvůli útoku přicházejícímu ze směru prodloužené osy dráhy, může být vhodnější změnit orientaci bezpilotního letadla otočením o  $180^\circ$  okolo svislé osy. Úhel naklopení kamery pak nebude potřebovat přičtení dříve zmíněné hodnoty  $90^\circ$  a obraz nebude převrácený. Tento manévr závisí na konkrétní situaci a konkrétním dálkově řídicím pilotovi provádějícím daný let. Trajektorie letu se nezmění a orientaci bezpilotního letadla by mělo být možné měnit i v průběhu mise, stejně jako naklopení kamery.



Obrázek 3.14: Parametry detekčního letu ve druhé fázi - v konstantní výšce.

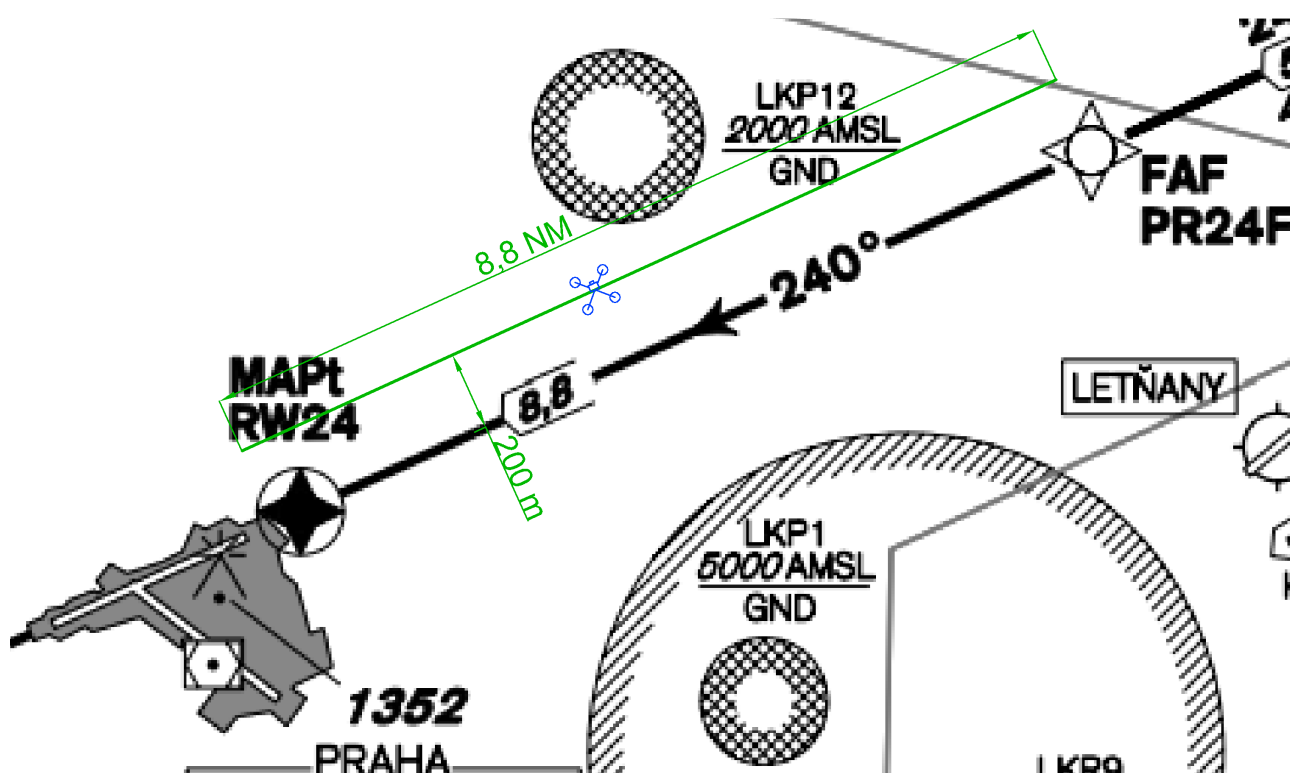
Jak bylo popsáno na začátku této kapitoly, nepředpokládá se přítomnost útočnicka uvnitř perimetru letiště. Tato plocha tedy nebude předmětem pátrání v následujících scénářích, kdy bude trajektorie letu bezpilotního letadla dosahovat maximálně na úroveň oplocení letištních pozemků.

### 3.4.1 Přiblížení na přistání na RWY 24 – zdroj záření severně od trati

Při útoku ze severní strany během přistání na RWY 24 přichází svazek do kokpitu z pravé strany, větší nebezpečí tedy hrozí pilotovi na místě prvního důstojníka. Zásadní pro tento případ tedy je, aby se bezpilotní letadlo pohybovalo severozápadně od prodloužené osy dráhy. Základní variantou letu bude trajektorie podél celého konečného přiblížení, která bude schopná pokrýt prostor, odkud bude možné zasáhnout přistávající letadlo v kterékoli části této fáze letu. Způsob provedení tohoto letu je popsán v předešlých odstavcích této kapitoly. Půdorys trajektorie takového letu je znázorněn na obrázku 3.15.

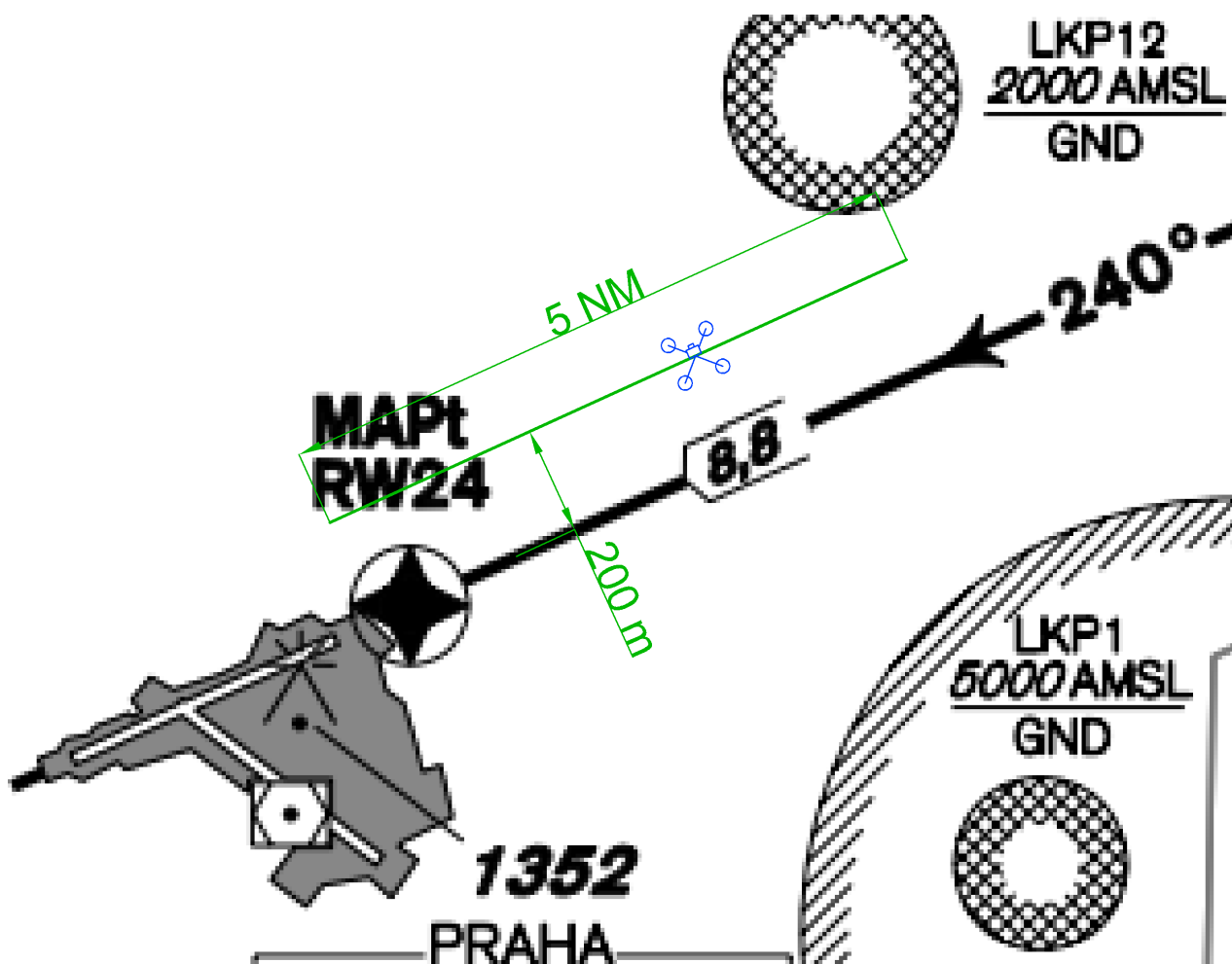
Druhou variantu bude možné použít, pokud se podaří blíže určit útočnickovu pozici a bude jasné, že laserové záření přichází z druhé poloviny tratě finálního přiblížení. Umístění útočnicka v této oblasti mu poskytuje několik výhod. Například možnost přímého zásahu interiéru kokpitu trvá déle, než kdyby útok probíhal v ranější fázi konečného přiblížení. To je dáno faktem, že výhled z pilotní kabiny je díky konstrukci letadel umožněn převážně dopředu, do strany je výhled omezen na přibližně 110° až 130° od podélné osy letadla, pokud nedojde k vyklonění pilotovy hlavy do strany. Útok ze strany, byť šikmo ze strany, nemá velkou šanci na úspěch, proto je útočník očekáván spíše před letadlem.

Druhým důvodem pro volbu této polohy je malá letová výška letadla, při bočním útoku tedy může být pro útočníka jednodušší kokpit zasáhnout i z menší vzdálenosti od osy dráhy, což vychází z omezeného výhledu z kokpitu směrem dolů.



Obrázek 3.15: Základní trajektorie letu severozápadně od osy dráhy [32].

K použití tohoto scénáře se přikročí v případě, že piloti nahlásí laserový útok ve chvíli, kdy se jejich letadlo nachází méně než 5 námořních mil od prahu dráhy. Tím dojde ke zmenšení území, které bude nutné monitorovat bezpilotním letadlem, šance na úspěšnou detekci budou tím pádem větší. Bepilotní letadlo se tedy bude také pohybovat ve vzdálenosti do 5 námořních mil od prahu dráhy, jak je zaznamenáno na obrázku 3.16. Vertikálně půjde o totožný případ jako v první variantě – bezpilotní letadlo bude klesat během přiblížování se k letišti do výšky 2579 stop a dále bude pokračovat v konstantní výšce. Zde se předpokládá, že útok nebude veden zpoza letadla, ačkoli to výhledové poměry z kokpitu v omezené míře umožňují. Pokud by takováto situace nastala, použije se předchozí scénář pro plnou délku konečného přiblížení. Vzdálenost 5 mil nebyla vybrána na základě konkrétních parametrů, lze ji tedy kdykoli změnit, například podle zkušeností nebo přesných dat o polohách útočníků z dříve zaznamenaných útoků.



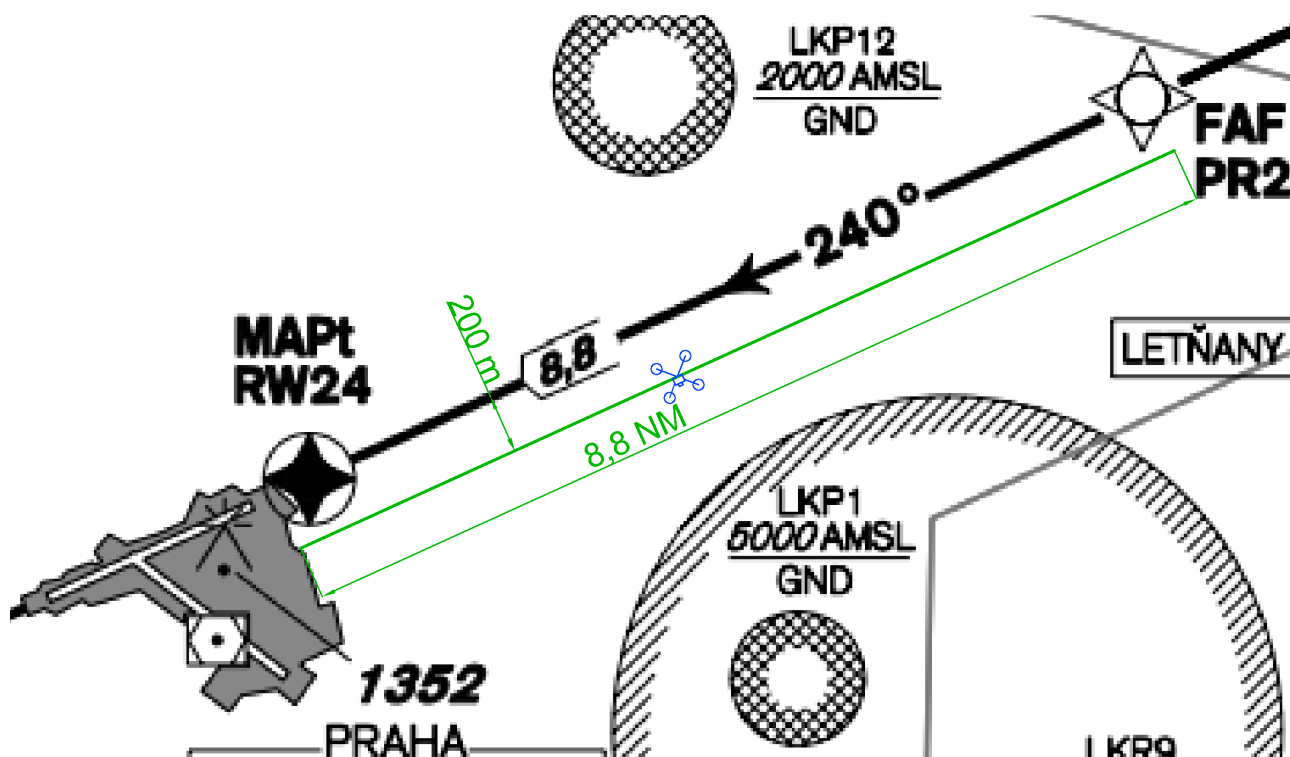
Obrázek 3.16: Zkrácená trajektorie letu severozápadně od osy dráhy [32].

### 3.4.2 Přiblížení na přistání na RWY 24 – zdroj záření jižně od trati

Tato situace je podle zpracování dat ze systému ECCAIRS nejčastější, lze tedy předpokládat, že se bude nejvíce opakovat [8]. Nasvědčuje tomu i fakt, že v tomto směru se nachází metropolitní oblast hlavního města s vysokou hustotou zalidnění. Na základě zkušeností může být tedy vytvořeno více kratších trajektorií, než tomu bylo v předchozím případě, aby se vyhledávání zaměřilo co nejpřesněji na cílovou oblast. Pro případ, kdy pilot nebude schopen přesně odhadnout polohu zdroje, je však stále žádoucí mít k dispozici i obecnou vyhledávací misi, která pokryje co největší část konečného přiblížení.

Tato bude probíhat v podstatě identicky jako první mise v předchozí podkapitole, jen v tomto případě bude trajektorie umístěna jihovýchodně od osy dráhy – viz obrázek 3.17.

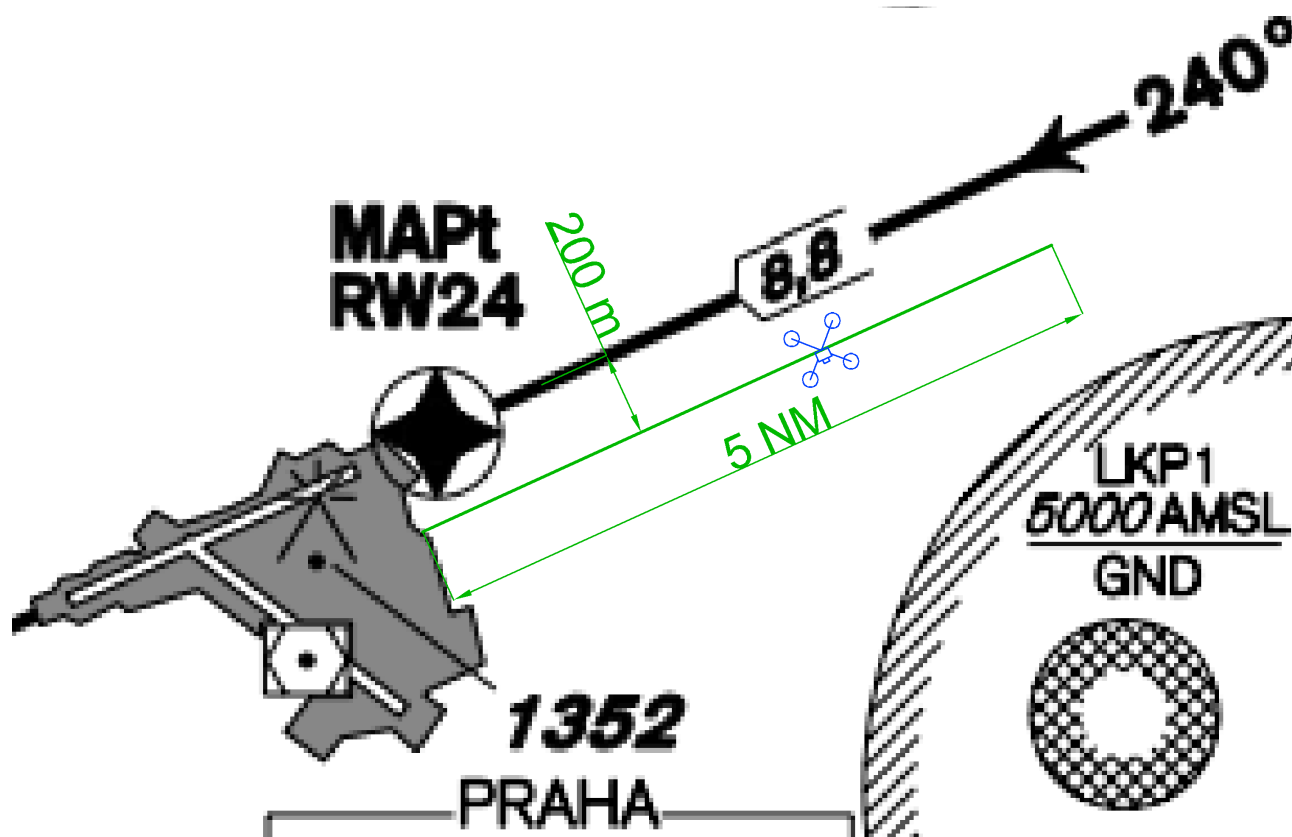
Stejně jako u předchozí sady scénářů, i zde je vhodné zahrnout alespoň jednu zkrácenou trajektorii určenou pro případ útoku přicházejícího z druhé poloviny konečného přiblížení. I zde se pro přehlednost a názornost navrhuje upravit délku trajektorie na 5 NM s identickým průběhem výškového profilu, jako při zkrácené variantě s útoky přicházejícími ze severu (obrázek 3.18). Tento scénář je



Obrázek 3.17: Základní trajektorie letu jihovýchodně od osy dráhy [32].

možno nazvat například koncovým a obdobně k němu mohou být vytvořeny například počáteční a střední scénář, které budou obsahovat různé části základní trajektorie – budou začínat později nebo končit dříve než plná verze. Vytvoření těchto scénářů proběhne analogicky ke zde představeným zkráceným variantám a následně může být každý individuálně upraven, například s přihlédnutím k terénu v dané oblasti nebo k historickým datům a zkušenostem.





Obrázek 3.18: Zkrácená trajektorie letu jihovýchodně od osy dráhy [32].

### 3.5 Konzultace s LS PČR

Pro ověření praktického přínosu a případného zavedení navrhovaného řešení do provozu byla práce konzultována se zástupci Letecké služby Policie České republiky, konkrétně s vedoucím pilotního oddělení, plukovníkem Tomášem Vlasákem a odborníkem na bezpilotní letadla, podplukovníkem inženýrem Viktorem Nathem. Z tohoto rozhovoru vyplynulo několik důležitých poznatků i zásadních připomínek, které vnášejí do práce lepší představu o možnostech reálného nasazení a překážkách, které by k tomu bylo třeba překonat.

Prvním důležitým výstupem z této konzultace je informace, že piloti LS používají při letech v noci noktovizory, tedy zařízení pro noční vidění. To jsou elektronická zařízení, která zesilují zbytkové světlo dopadající na jejich senzory a po zesílení je promítají posádce na displeje v jejich zorném poli. Tato zařízení nejsou průhledná ani průsvitná. Tím téměř zaniká nebezpečí, které by mohlo vzniknout při zásahu oblasti pilotovy hlavy laserovým svazkem.



Snižuje se tím přínos zde navrhovaného systému, jehož velkou předkládanou předností bylo právě snížení nebezpečí pro piloty vrtulníků vyhledávající útočníka.

Dále byla vyslovena obava o bezpečnost leteckého provozu v době letu bezpilotního letadla. Ač by se mělo jednat o koordinované a schválené lety provozované LS nebo provozovatelem letiště, pohlíží se na bezpilotní letadla v blízkosti letišť, podle slov pana Natha, jako na „překážku civilního letectví“. Vzniká tedy obava, že při vyhledávání útočníka by nebylo bezpečné pokračovat v běžném provozu okolních letadel. Tato obava vychází především z faktu, že dnešní bezpilotní letadla nejsou certifikovanými letadly a poskytují tedy menší záruky v oblasti požadavků na přesnost, redundanci, údržbu, kvalitu výroby a další. Kvůli tomuto faktu se oba odborníci domnívají, že by nebylo bezpečné a vhodné, aby se takovéto stroje pohybovaly v těsné blízkosti příletových tratí. Toto byly obavy ohledně míry rizika provozu bezpilotního letadla ve vzduchu. K tomu je potřeba zvážit také míru rizika, která vzniká pro osoby a objekty na zemi. Navrhovaný provoz předpokládá přelétávání komunikací a elektrického vedení a do omezené míry také zastavěných oblastí. V případě mimořádné události, například poruchy některé pohonné jednotky bezpilotního letadla, vzniká nezanedbatelné riziko poškození majetku či újmy na zdraví osob v dopadové oblasti, která vzhledem k navrhovaným výškám provozu, dosahuje značných rozměrů. Byla tedy vyslovena obava, že tento provoz přináší větší míru rizika v porovnání s tím, jaké riziko se snaží eliminovat.

Na základě zkušeností s vyhledáváním útočníků se zdrojem laserového záření bylo také konstatováno, že laserové útoky zpravidla trvají velmi krátce, řádově sekundy, a je tedy velmi obtížné přesně zaměřit místo, odkud svazek přichází. A i v případě úspěšné lokalizace se může policie potýkat s problematickým dokazováním daného činu konkrétnímu pachateli. Zde shledává plukovník Vlasák aktivitu vrtulníku s posádkou na palubě jako účinnější v porovnání s bezpilotním letadlem, neboť posádka má možnost udržovat s nalezeným pachatelem neustálý vizuální kontakt a buďto k němu navádět policejní hlídku, případně, pokud to situace umožňuje, provést přistání do terénu a útočníka zadržet. Toto je s bezpilotním letadlem komplikované, neboť navádění pozemních jednotek by muselo probíhat z pilotova stanoviště a vzhledem k relativně nízké kapacitě baterií dnešních bezpilotních letadel je velká pravděpodobnost, že dojde k přerušení vizuálního kontaktu před příjezdem hlídky z důvodu nutného návratu bezpilotního letadla a výměny akumulátorů.

Poslední vyřčená obava se týkala letů policejních a záchranářských vrtulníků a nebezpečí, které by pro tyto lety představoval provoz bezpilotního letadla v bezprostřední blízkosti letiště. Této nebezpečné situaci mělo být, podle návrhu této práce, zabraňováno buďto pokynem ATCO, který by dálkově řídícímu pilotovi bezpilotního letadla doporučil kurz k vynutí nebo přistání do terénu před



příletem vrtulníku. To bylo argumentováno sdělením, že kontakt posádky vrtulníku se stanovištěm ŘLP probíhá bezprostředně před vzletem, ATCO má tedy velmi málo času pro reakci a úpravu právě probíhajícího provozu. Druhou možností byl pak předpoklad sdílení informace o aktivitě bezpilotního letadla v rámci LS. Zde autor očekával, že dálkově řídicí pilot bezpilotního letadla bude informován o výzvě ke vzletu vrtulníku a bude mít prostor přijmout náležitá opatření, aby se v době průletu vrtulníku pohyboval v dostatečné vzdálenosti a naopak že posádka vrtulníku bude informována o probíhající aktivitě bezpilotního systému, protože jejím provozovatelem bude také LS PČR, stejně jako zřizovatelem stanice LS na letišti Václava Havla. Tato domněnka však byla pracovníky LS vyvrácena, neboť vzlety vrtulníků nemusejí být koordinovány pouze jedním stanovištěm. To je založeno na faktu, že pražská letecká služba poskytuje lety pro Policii ČR v Praze, případně Středočeském kraji, dále lety pro záchranku hlavního města Prahy a na vyžádání i pro záchranku Středočeského kraje či pro Hasičský záchranný sbor. Každá z těchto složek disponuje vlastním dispečinkem, ze kterého přichází výzva ke vzletu, informace o vzletu vrtulníku a směru letu se tedy k dálkově řídicímu pilotovi bezpilotního letadla zřejmě nedostane včas.

Oba odborníci se tedy shodli na tom, že ačkoli je provozování zde navrhovaného systému technicky možné a zřejmě by bylo umožněno i po legislativní stránce, shledávají značné limitace, které nemusejí být dostatečně ospravedlněny přínosy, a to jak z pohledu bezpečnosti, tak ani z pohledu efektivity či ekonomičnosti.

### **3.6 Konzultace s odborníkem na bezpilotní prostředky**

Návrhy předložené v této práci byly před jejím dokončením představeny panu doc. Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D., odborníkovi na provoz bezpilotních prostředků. Pan docent kladl důraz na zajištění dostatečné míry bezpečnosti provozu, a to z pohledu rizik, která provoz bezpilotního letadla představuje jednak ve vzduchu pro okolní provoz a jednak pro osoby a majetek na zemi v okolí oblasti, ve které se letadlo pohybuje. Tato bezpečnost by měla podle doporučení pana docenta být dostatečně vysoká, aby bylo možné bezpilotní letadlo provozovat podle pravidel pro kategorii Specific, neboť obdržet příslušná povolení a certifikace pro provoz v kategorii Certified je v dnešní době velmi obtížné a pro tento provoz těžko dosažitelné. Po představení prostředků, kterými se navrhuje vybavit bezpilotní letadlo využívané pro tento konkrétní druh provozu, byl pan docent přesvědčen, že tato opatření jsou dostatečná k tomu, aby byl tento provoz možný jak z hlediska požadavků kladených současnou legislativou, tak i z pohledu míry rizika, které by mohlo vzniknout provozem tohoto letadla v blízkosti okolního leteckého provozu.



Pan docent dále vyjádřil obavu z vlivu turbulence v úplavu přilétajících letadel, která by mohla mít negativní vliv na bezpilotní letadlo. To spolu s absencí konkrétních pravidel pro vzdálenost dvou letadel pohybujících se ve stejné oblasti, se kterou se autor setkal v aktuálně platné letecké legislativě, vedlo k doporučení pana docenta k návrhu takové horizontální a vertikální vzdálenosti, která by odpovídala rozměrům ochranných prostorů přesného přístrojového přiblížení (ILS). Tyto parametry nakonec nebyly v práci uvažovány, neboť se předpokládá pohyb bezpilotního systému i ve výšce vyšší, než v jaké se bude pohybovat ostatní letecký provoz a každopádně tedy dojde k narušení těchto prostorů. Ke zvážení využití rozměrů těchto ochranných prostorů pro zde navrhované využití však bude vhodné provést další výzkum.

### **3.7 Simulace navrhovaného provozu na ATC simulátoru**

Ke konci psaní této práce byly zde předložené návrhy na provoz otestovány na simulátoru řízení letového provozu, který je součástí Laboratoře ATM systémů na Fakultě dopravní ČVUT pod vedením pana Stanislava Schmidta. Tato simulace si kladla za cíl zjistit, jak by ATCO na dotčeném stanovišti tower reagoval na provoz bezpilotního letadla podle parametrů navrhovaných touto prací. Dále se zkoumalo jaký vliv by mělo bezpilotní letadlo na pracovní vytížení ATCO a jaké by bylo jeho subjektivní vnímání takového provozu. Přípravné fáze, stejně jako role koordinátora tohoto cvičení, se ujal pan Schmidt, pozici ATCO obsadil pan Lukáš Veselý, který má za sebou šest měsíců intenzivního výcviku, na jehož konci se má stát certifikovaným řídicím letového provozu pro stanoviště tower a approach. Autor práce byl simulaci přítomen jako pozorovatel a po simulaci se aktivně účastnil rozboru a zisku zpětné vazby. Ze simulace byl pořízen audiovizuální záznam pro možnost zpětné analýzy průběhu.

Parametry simulace vycházely ze scénáře popsaného v podkapitole 3.4.2 této práce. Odchytkou od tohoto scénáře byla horizontální vzdálenost bezpilotního letadla od osy dráhy, která byla stanovena na 0,3 NM, tedy asi 556 metrů. K této změně došlo z důvodu obav, že vzhledem k malému množství informací, které měl ATCO pro tuto simulaci k dispozici, by menší vzdálenost mohla vyústit v takovou míru nedůvěry ATCO v bezpilotní systém, že by se obával kolize a vydal by radu k vyhnutí. Tato simulace však vyžadovala pokračování provozu i za přítomnosti bezpilotního letadla.

Zadání tedy obsahovalo tyto parametry: Vzlet bezpilotního systému přibližně z polohy heliportu 2 na letišti a přesun na místo započítání detekční mise měly proběhnout na samém začátku simulace. Horizontální rychlost bezpilotního letadla byla fixně nastavena na 15 m/s a vertikální rychlost se pohybovala okolo 200 ft/min. Výška zahájení mise byla nastavena na 2580 stop altitude. Výše navržená horizontální vzdálenost od prodloužené osy dráhy měla zůstat konstantní. Po dosažení vzdálenosti 6 NM od prahu dráhy mělo přejít bezpilotní letadlo z horizontálního letu do letu

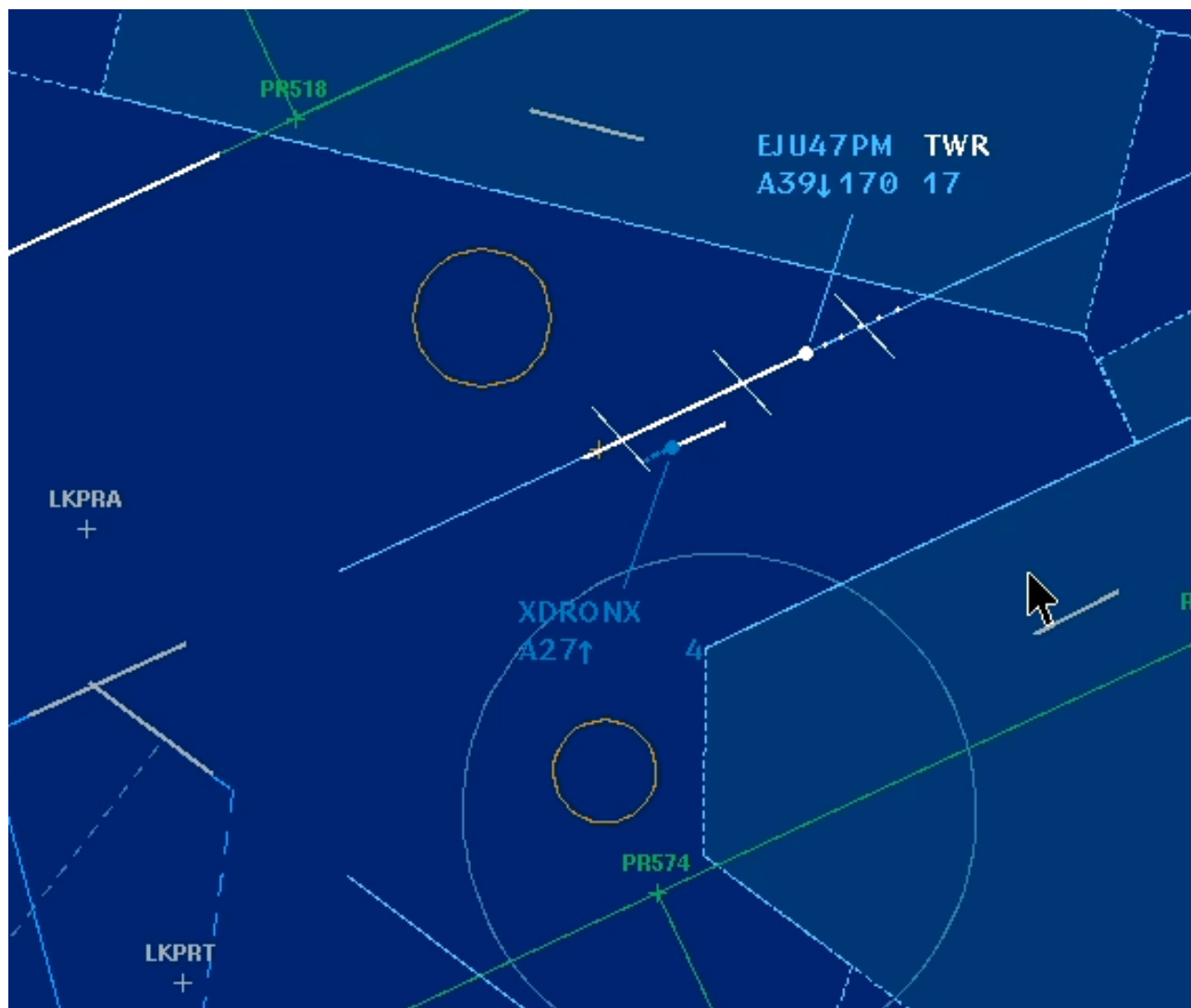


stoupavého a pokračovat do výšky 3500 stop, kterých mělo dosáhnout téměř na úrovni FAF. V tomto místě mělo dojít k zastavení a změně směru letu nazpět za stejných podmínek v opačném pořadí, tedy klesání do výšky 2580 stop a následný horizontální let v této výšce na úroveň prahu dráhy. Takto se měl pohybovat po celou dobu simulace, pokud by nepřišel od ATCO jiný pokyn, kterému by bylo případně vyhověno.

Simulace byla zahájena obeznámením ATCO s aktuální situací, tedy s hlášenou laserovou aktivitou a s provozem bezpilotního letadla podle výše popsaných kritérií. K přechodu leteckého provozu na frekvenci tower docházelo o něco dříve než obvykle. Tím měl být pro ATCO zajištěn dostatek času pro předávání potřebných informací a případnou možnost reagovat na vzniklé situace. Vzlet tohoto letadla proběhl krátce po zahájení simulace. O pár minut později došlo k přechodu prvního provozu na rádiovou frekvenci obsazenou ATCO. Ten předal posádce informaci o hlášené laserové aktivitě a o poloze bezpilotního letadla. ATCO byl informován provozovatelem dronu (zde zastupován koordinátorem simulace) o změnách ve svém letu. První takovou informací byl přechod do stoupavého letu a pokračování směrem na úroveň FAF. Krátce před vykřížováním přistávajícího letadla a bezpilotního letadla oznámila posádka letadla bezpilotní letadlo v dohledu, na což reagoval ATCO povolením k přistání. Okamžik vykřížování podobného provozu je pro názornost uveden na obrázku 3.19, kde lze vidět letadlo ustálené na sestupové rovině v konečné fázi přiblížení a jižně od něj bezpilotní provoz. Po vykřížování provozu následovala asi minuta, kdy nebyla od ATCO vyžadována další aktivita a v této době koordinátor zopakoval některé informace, konkrétně fakt, že přilétávající provoz dostává informaci o hlášené laserové aktivitě od stanoviště approach. Následoval přechod druhého přilétávajícího provozu na frekvenci tower. Tomu bylo ATCO vydáno povolení k pokračování v přiblížení následované informací o výskytu bezpilotního letadla. ATCO se rozhodl předat přesné informace o bezpilotním provozu znovu o asi 30 sekund později, kdy byly oba provozu v relativně malé vzdálenosti od sebe a byla vyšší šance, že posádka letadla naváže s bezpilotním letadlem vizuální kontakt. Tato informace byla doplněna o informaci „no factor“, která vycházela z ujištění ATCO, že bezpilotní letadlo zachová bezpečnou vzdálenost od prodloužené osy dráhy.

Následující přílety byly odbaveny velmi podobným způsobem. Po přechodu na příslušnou frekvenci byla všem posádkám předána informace o provozu bezpilotního letadla v prostoru konečného přiblížení, která bývala zpravidla upřesněna ve chvíli, kdy se vzájemná vzdálenost letadla a bezpilotního letadla snížila natolik, že se ATCO domníval, že může dojít k vizuálnímu kontaktu.

Důležitou součástí této simulace byl následný debriefing všech zapojených osob. Pan Veselý, zastávající pozici ATCO, připustil částečnou nedůvěru v provoz bezpilotního letadla, zejména v



Obrázek 3.19: Výřez obrazovky přehledového systému využívaného ATCO pro tuto simulaci s viditelnou polohou přilétávajícího provozu a bezpilotního letadla [Stanislav Schmidt].

zachování dostatečné vzdálenosti mezi bezpilotním letadlem a ostatním provozem. K tomu mohl přispívat fakt, že použitý simulátor je určen pro stanoviště approach, pro tuto simulaci tedy neměl ATCO k dispozici přímý výhled z řídicí věže a musel se spoléhat čistě na přehledové systémy. Připustil při tom pocit diskomfortu při pohledu na malou vzdálenost symbolů označujících bezpilotní a ostatní provoz. Kromě toho pociťoval zvýšenou zátěž vycházející z nutnosti poskytovat každému přilétávajícímu letu informaci o provozu bezpilotního letadla.

Po následné krátké debatě, během které byl představen celý provoz do větších detailů, pan Veselý připustil, že s těmito informacemi by cítil větší komfort při koordinaci takového druhu provozu. Potvrdil také autorovu domněnku, že by výrazně pomohlo důvěře ATCO v takto specifický provoz, kdyby byli všichni řídicí letového provozu s celým tímto systémem do detailu seznámeni v rámci školení, případně výcviku. Jasně by jim to mohlo představit schopnosti a limity tohoto systému



a mohli by být schopni přesněji reagovat na nastalé situace v porovnání s tímto cvičením, kdy měl ATCO k dispozici naprosté minimum informací. Dále byla zmíněna obava o koordinaci tohoto provozu s lety policejních vrtulníků pro potřeby záchrany života či jiné aktivity IZS. Zde pan Schmidt doplnil domněnku, že vzhledem ke schopnosti pružně reagovat změnou směru letu, výšky či rychlosti, případně přistáním do terénu, vnímá tento provoz bezpilotního letadla jako menší ohrožení záchranářských letů v porovnání například s lety IFR, které takovou pružností nedisponují. Diskutována byla také horizontální vzdálenost zvolená pro toto cvičení. Pan Veselý se domníval, že snížení této vzdálenosti pod 0,3 NM by v něm vyvolalo tak velkou nedůvěru v bezpečnost a ve schopnost bezpilotního letadla udržet tuto vzdálenost přesně, že by s tímto provozem zřejmě nesouhlasil. Vyřkl také obavu z nedostatečného rozlišení dostupných přehledových systémů, kdy se obával, že by mohlo dojít k překrytí symbolů zobrazujících jednotlivá letadla.

Závěrem proběhlo zhodnocení celé simulované situace, během které došli všichni zapojení ke konsenzu v tom, že zde simulovaný provoz je za daných parametrů možný, za standardní situace nepředstavuje zvýšené nebezpečí pro letecký provoz a že rozhodujícím faktorem pro provedení takového letu je subjektivní vnímání tohoto provozu samotným ATCO. Pokud je tedy dostatečně zaručena přesnost a bezpečnost provozu bezpilotního letadla a pokud je ATCO dobře informován o jeho provozu, je opodstatněné se domnívat, že by byl schopen a ochoten podpořit takovýto provoz jeho schválením bez dramatického zásahu do okolního provozu, jakým by mohla být například změna dráhy v používání nebo příkaz k signifikantní změně výšky nebo vzdálenosti bezpilotního letadla od osy dráhy v případě přibližujícího se letadla.

Omezením této simulace mohl být nedostatek zkušeností pana Veselého v pozici ATCO. I přesto byl však obeznámen s principy a pravidly pro řízení přilétajícího provozu a svou roli v rámci této simulace byl schopen splnit. Případný navazující výzkum může provést obdobnou simulaci se zkušeným ATCO a porovnat například míru důvěry ve zkoumaný provoz. Autor dále během simulace zaznamenal nepřesnost vycházející z konstantní rychlosti dopředného pohybu bezpilotního letadla, která se projevila při změně směru letu na otočných bodech. Zde docházelo ke skutečnému otáčení a dočasnému opuštění plánované trajektorie, jak by se dalo předpokládat od letadla s fixními nosnými plochami. Jelikož však tato práce předpokládá využití vícerotorového letadla, došlo by na otočném bodě pouze ke snížení dopředné rychlosti na nulu a k následnému zrychlení v opačném směru, k opuštění stanovené trajektorie by však nedošlo.



## 4 Diskuze výsledků

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout obecný postup pro využití bezpilotního systému k detekci laserového svazku s cílem zjištění polohy jeho zdroje a následně ověřit proveditelnost tohoto postupu. Zásadními faktory pro tento návrh byly legislativní a provozní požadavky a do jisté míry také technické požadavky na samotný bezpilotní systém, především na detekční snímač. Složitost tohoto provozu spočívá především v prostoru CTR a relativně vysokých výškách, ve kterých má být prováděn. Maximální ohled tedy musel být brán na zachování bezpečnosti pro okolní provoz, zejména pak pro lety s osobami na palubě.

Z analýzy současné legislativy vyplynulo, že provoz bezpilotních systémů v CTR je možný, a to jak pro civilní, tak státní provozovatele, například Policii ČR. Požadavky na tento provoz se různí podle hmotnosti bezpilotního letadla, polohy a výšky prováděného letu a především podle pravidel pro dohlednost, kterými se tento provoz bude řídit (VLOS/BVLOS). Lety za VLOS lze v zásadě rozdělit do tří kategorií. První z nich jsou lety v blízkosti letiště, konkrétně v okruhu do 5,5 km od jeho vztažného bodu. Zde je provoz povolen pouze mimo ochranná pásma letiště a pouze pro stroje o nízké hmotnosti. Maximální výška letu je zde omezena hodnotami udanými v takzvaném gridu publikovaném na webu Letecké informační služby [16]. Druhou kategorií jsou lety ve větší vzdálenosti od letiště, i zde se maximální povolená výška letu řídí gridem. Odpadá však omezení hmotnosti stroje. Ani jedna z těchto variant není pro účely této práce vhodná, neboť povolené výšky jsou příliš nízké pro účinné nalezení útočníka. Poslední možností je takzvaný nestandardní let, pro který je vyžadováno oprávnění od ÚCL a koordinace s ŘLP a provozovatelem letiště. Toto je aktuálně nejlepší způsob, jakým provést požadovaný let, odhlédneme-li od speciálních letů bezpečnostních složek a požadavků na změnu legislativy. Aktuálně je proveditelnost tohoto letu vázána na pravidla letu za VLOS. Lze však důvodně předpokládat, že v určité fázi letu bude bezpilotní letadlo v takové vzdálenosti od dálkově řídicího pilota, že již nebudou splněny podmínky pro VLOS a bude nutné přejít na let BVLOS. To aktuální pravidla létání neumožňují jinak, než zajištěním segregace od okolního provozu. Toto není použitelným řešením z důvodu potřeby zachování leteckého provozu v prostoru, kde se má bezpilotní systém používat. V omezených možnostech provozovat bezpilotní systém za podmínek BVLOS tedy leží největší limitace zde navrhovaného systému.

Několika experimenty bylo přímo ověřeno, že laserový svazek je možné detekovat pomocí klasického digitálního záznamového zařízení – digitální kamery. Byly však zjištěny limity, které neumožňovaly viditelnost samotného svazku, pokud nebyl namířen ke kameře pod poměrně malým úhlem. V menší vzdálenosti laseru od kamery byla viditelnost svazku lepší. Z těchto pokusů tedy vyplývá, že detekce laserového svazku s využitím bezpilotního letadla je možná a proveditelná, pro kvalitní výstupy však





bude nutné najít vhodný snímač, jehož charakteristiky umožní zvýšit viditelnost svazku v obraze. Jednou z možností navrhovanou k bližšímu prozkoumání jsou kamery určené pro noční vidění, které zesilují dopadající světlo. Případně je možné pokusit se využít snímače zaměřené na specifické vlnové délky, které jsou u laserových svazků známé.

Následně byla vytvořena geometrická analýza zásahu kokpitu letadla laserovým svazkem. Z té vyplynula, mimo jiné, existence pásma přímo pod letadlem a v malé vzdálenosti před ním, ze kterého nelze kokpit zasáhnout a laserové záření z něj přicházející tedy nepředstavuje bezprostřední hrozbu. Tím byly vyčleněny oblasti, kterým je potřeba věnovat nejvíce pozornosti a pro tyto byla následně navržena obecná podoba trajektorie detekčního letu, která se řídila z velké části průběhem trati konečného přiblížení.

Navržená trať byla spolu s plánem praktické podoby samotného letu konzultována s odborníkem na ATM. Výstupem z této konzultace bylo konstatování, že z pohledu postupů, pravidel a požadavků stanovišť řízení letového provozu nebyly shledány překážky, které by návrh prezentovaný v této práci znemožňovaly. Důležitým poznatkem je, že schválení každého takového letu, a především jeho minimální vzdálenosti od okolního provozu, je na rozhodnutí pracovníka řízení letového provozu na stanovišti tower, který odpovídá za bezpečnost v daném vzdušném prostoru.

Praktickým výstupem všech výše zmíněných částí i celé této práce je databáze několika základních trajektorií, po kterých se navrhuje provoz bezpilotního systému, aby byla šance na detekci laserového útoku co největší při zachování bezpečného odstupu od provozu v konečné fázi přiblížení na přistání na RWY 24 Letiště Václava Havla Praha. Tyto mají za cíl posloužit jako základ pro případné návrhy dalších letových scénářů založených například na historických datech o výskytech laserových útoků.

#### **4.1 Identifikované limitace a jejich eliminace**

Pro validování výsledků dosažených v této práci je v této podkapitole představen seznam všech omezení, které byly v souvislosti s tímto provozem identifikovány. Ke každému bude také přiřazen návrh jeho řešení buďto jako reálně použitelné řešení anebo, pokud toto nebude možné, bude zde navrženo alespoň možné řešení, které by bylo možno provést například v případě změny legislativy či na základě technologického pokroku.



Tabulka 4.1: Tabulka limitací navrhovaného provozu a jejich možných eliminací

Číslo	Identifikovaná limitace	Eliminace
1	Předpokládá se udělení letového povolení ke konkrétnímu letu.	Všechny scénáře jsou předem jasně definované a na jejich implementaci se mají podílet všechny zúčastněné strany včetně ŘLP tak, aby nebyl důvod k neschválení tohoto provozu. Pokud by k tomu i přesto došlo, má dálkově řídicí pilot možnost změnit letové parametry tak, aby splnil požadavky ATCO.
2	Laserový svazek není na záznamu vždy dobře viditelný, zejména, pokud je pozorován ve směru kolmém k rovině, ve které se svazek nachází.	Geometrie letu byla volena tak, aby se bezpilotní systém dostal co nejbližší k samotnému svazku a tím se maximalizovala jeho viditelnost. Pro zvýšení viditelnosti svazku se navrhuje použití zvláštního snímače schopného úspěšně zobrazovat a případně zesilovat světlo o vlnové délce odpovídající nejběžnějším laserovým zářením.
3	Z důvodu vyšší úspěšnosti detekce je žádoucí, aby se bezpilotní systém pohyboval co nejvýše, tedy co nejbližší leteckému provozu. Neexistuje však legislativa stanovující konkrétní minimální vzdálenost mezi těmito letadly.	Trajektorie letu bude plánována za přítomnosti pracovníků ÚCL tak, aby ATCO na příslušném stanovišti (tower) nevnímali tento provoz jako ohrožení bezpečnosti letového provozu. Jediným nalezeným kritériem je zde totiž subjektivní vnímání ATCO a jejich důvěra k bezpilotnímu systému.
4	Vzhledem k předpokládanému nočnímu provozu a velkým vzdálenostem mezi dálkově řídicím pilotem a bezpilotním letadlem, zřejmě nebude možné udržet bezpilotní letadlo v přímém dohledu dálkově řídicího pilota. Půjde tedy o provoz BVLOS.	Bude nutno splnit vysoké požadavky na bezpečnost jak ve vzduchu, tak na zemi, dále například na vysokou redundanci palubních systémů a vysokou míru přesnosti navigačních systémů. Pro takovýto druh provozu je tedy nutno zvolit vhodné bezpilotní letadlo včetně příslušenství, případně bude nutno využít certifikované bezpilotní letadlo. V krajním případě by muselo dojít ke změně legislativy upravující provoz bezpilotních prostředků bez dohledu dálkově řídicího pilota (BVLOS).

Continued on next page



Tabulka 4.1: Tabulka limitací navrhovaného provozu a jejich možných eliminací (Continued)

Číslo	Identifikovaná limitace	Eliminace
5	Provoz bezpilotních systémů uvnitř CTR je legislativně omezen a pro jeho povolení je nutno splnit řadu požadavků.	Provoz bude v předstihu schválen podle aktuálně platné legislativy. Sem patří například požadavek na koordinaci se stanovištěm ŘLP a provozovatelem letiště, stálé obousměrné spojení dálkově řídicího pilota se stanovištěm ATC či vybavení bezpilotního letadla odpovídačem sekundárního radaru (SSR). Budou-li splněny tyto požadavky, je provoz v CTR možný.
6	Existuje riziko vzniku kolizní situace s lety policejních nebo záchranářských vrtulníků, které se nepohybují po standardních tratích.	Dálkově řídicí pilot dronu dostane o tomto provozu informaci a buďto aktivuje automatický let například pro návrat na místo vzletu nebo převezme nad strojem kontrolu a s ohledem na provoz změni polohu a výšku tak, aby nepředstavoval nebezpečí konfliktu. Případně, pokud pro to budou vyhovující podmínky a dostatečná znalost terénu, může bezpilotní letadlo přistát na vhodném místě a v letu pokračovat po vykřížování s vrtulníkem.
7	Očekávaná vyšší hmotnost bezpilotního systému může představovat značné nebezpečí pro osoby a majetek na zemi.	Stroj by měl být vybaven záložními systémy, nouzovým padákovým systémem, případně i funkcí nouzového přistání s jedním či více nepracujícími motory. Tím se minimalizuje riziko spojené s dopadovou energií stroje v případě mimořádné situace.
8	Pro geometrii zásahu byla použita zjednodušená interpretace terénu jako vodorovné plochy s nadmořskou výškou odpovídající nadmořské výšce prahu dráhy.	Pro reálné vyobrazení bude nutné simulovat polohu útočnicka na reálném zemském povrchu, což zapříčiní změnu vertikální vzdálenosti útočnicka od letadla. Rovnice pro přepočet této vzdálenosti jsou součástí této práce, reálný zemský povrch nikoli.

Continued on next page



Tabulka 4.1: Tabulka limitací navrhovaného provozu a jejich možných eliminací (Continued)

Číslo	Identifikovaná limitace	Eliminace
9	Jsou uvažovány pouze základní směry, ze kterých je možné zasáhnout prostor kokpitu - ze směru podélné osy letadla a ze směrů kolmých k této ose, tedy přímo ze strany. Jiné rozhledové poměry nejsou uvažovány.	Pro komplexní analýzu možnosti zásahu kokpitu z různých směrů bude nutné provést detailní rozbor rozhledových poměrů z jednotlivých typů letadel. K tomu by bylo vhodné použít například 3D modely kokpitů nebo praktické měření.
10	Navrhovaná horizontální vzdálenost bezpilotního systému od trajektorie přistávajících letadel není založena na konkrétních výpočtech nebo požadavcích.	Jelikož neexistuje jednoznačný požadavek na minimální vzdálenost mezi letem VFR a IFR v prostoru třídy D, musela být tato vzdálenost navržena na základě subjektivního vnímání míry rizika, které tento provoz představuje. Úvodní návrh byl konzultován a na základě této konzultace se navrhuje jeho zvýšení z 200 m na 555,6 m (0,3 NM), což vychází z rozlišovacích a zobrazovacích schopností přehledových systémů používaných pro tuto simulaci a ze subjektivního vnímání osoby na pozici ATCO pro tuto simulaci.
11	Simulace navrhovaného provozu neprobíhala na odpovídajícím typu simulátoru a zkoumaným subjektem nebyl certifikovaný ATCO.	Ke vhodnému simulátoru neměl autor v době vzniku práce přístup, stejně tak se nepodařilo zorganizovat spolupráci s certifikovaným řídicím letového provozu. Simulace však přesto přinesla důležité poznatky. Pro detailnější ověření se navrhuje zorganizovat komplexní simulaci na vhodném typu simulátoru za přítomnosti odborníků na danou problematiku včetně certifikovaného řídicího letového provozu na simulované pozici ATCO.

Continued on next page



Tabulka 4.1: Tabulka limitací navrhovaného provozu a jejich možných eliminací (Continued)

Číslo	Identifikovaná limitace	Eliminace
12	Řídicí letového provozu během simulace vnímal nedůvěru v dodržení bezpečné vzdálenosti mezi bezpilotním systémem a okolním provozem.	Standardní vzdálenost těchto provozů je od začátku nutné navrhnout tak, aby nedocházelo k vyvolání pocitu vzniku potenciálně nebezpečné situace. Dále se navrhuje detailní seznámení pracovníků ŘLP s možnostmi, limity a parametry celého systému a také jejich aktivní zapojení do tvorby skutečných letových scénářů. Zde se jedná o subjektivní záležitost, kterou nelze podložit legislativními požadavky, je tedy nutné provést rozšiřující výzkum v této oblasti.
13	Očekává se zvýšení pracovní zátěže ATCO na pozici tower, protože musí neustále detailně monitorovat pohyb bezpilotního letadla a všem letům, kterých se to týká, poskytovat informaci o provozu bezpilotního letadla.	Část informací může letovým posádkám předávat stanoviště approach, aby se snížila zátěž ATCO na stanovišti tower. Dobře připravený a koordinovaný bezpilotní provoz může snížit obavy ATCO a umožnit mu se tak soustředit na činnosti, které vyžadují jeho plnou pozornost. Při mimořádných událostech je však zvýšená zátěž očekávaným vedlejším efektem.

## 4.2 Validace výsledků

Simulace navrhovaných scénářů potvrdila jejich proveditelnost z pohledu řídicích letového provozu.

Zde navrhovaný provoz byl porovnán s právní základnou upravující letecký provoz bezpilotních letadel i letadel s osobami na palubě a další související legislativou a nebyla nalezena žádná část, která by těmto dokumentům odporovala. Z legislativního hlediska je aktuálně nejsložitější zavedení letů za BVLOS, ani tento režim však české zákony neznemožňují.

Po technické stránce lze konstatovat, že požadavky na vybavení, letové vlastnosti a bezpečnostní prvky, požadované pro provoz za VLOS nejsou limitujícím faktorem, protože zde uvažované bezpilotní letadlo tyto požadavky splňuje. I zde byl problém identifikován při provozu za BVLOS, pro který je v ideálním případě doporučeno využít certifikované letadlo. Toto by například mělo disponovat funkcí automatického vyhnutí se provozu nebo být schopné letu podle pravidel IFR. Z pohledu samotné detekce laserového svazku bylo shledáno za vhodné, aby se bezpilotní prostředek pohyboval co



nejblíže tomuto svazku a tím se zvýšila jeho detekovatelnost v zaznamenaném obraze. Ačkoliv bylo experimentálně prokázáno, že takovou detekci je možno provést klasickým digitálním snímačem, doporučuje se provést rozšiřující výzkum s dalšími snímači či senzory, které by mohly být na vyhledávané světlo citlivější.

Pro praktický provoz vzniká velké omezení, které pramení z relativně malé vzdálenosti mezi bezpilotním letadlem a ostatním leteckým provozem. Autor si je těchto limitů vědom, předpokládá však zvýšení přesnosti, bezpečnosti a robustnosti bezpilotních prostředků v budoucnosti, což umožní lepší integraci do vzdušného prostoru společně s ostatními letadly. To umožní, mimo jiné, vytvořit jasné postupy pro řízení letového provozu, což zajistí možnost provádět zde navrhovaný provoz z pohledu řídicích letového provozu.

V porovnání s provozem vrtulníku s posádkou na palubě, který se dnes používá pro vyhledávání útočníků s laserový svazkem, přináší provoz bezpilotního systému vyšší bezpečnost, neboť nehrozí ztráta vizuálního vnímání okolí následkem oslnění laserovým světlem. Provoz takového systému je také ekonomicky přijatelnější, ať už jde o pořizovací náklady, náklady na údržbu, personál či provozní náklady na letový čas. Toto řešení lze také dobře využít na těch letištích, která se s laserovými útoky potýkají, nemají však ve své blízkosti k dispozici vrtulníkovou základnu schopnou poskytnout potřebné služby. Nevýhodou je pak nízká robustnost a spolehlivost aktuálně dostupných bezpilotních prostředků, mohou tedy představovat zvýšené riziko pro provoz ve vzduchu stejně jako pro osoby a majetek na zemi.



## 5 Závěr

Cíl práce je autorem považován za naplněný, včetně všech jeho dílčích částí. Došlo k navržení provozu detekčního systému a popisu jeho navrhovaných parametrů. Při tom byla zvažována legislativa a možnosti letu bezpilotního letadla v blízkosti trati konečného přiblížení. Teoreticky i prakticky byly prozkoumány možnosti detekce laserového svazku, v čemž spočívá jedna z limitací zde navrhovaného systému, bylo by tedy vhodné, aby se této problematice věnoval další výzkum, který by rozšířil zde nabyté poznatky. Dále byla vymodelována geometrie útoku laserovým svazkem na letadla, na jejímž základě byl představen návrh trajektorie letu bezpilotního letadla s detekčním aparátem na palubě. Celý návrh byl nakonec validován identifikací limitací a představením jejich řešení nebo, pokud nebylo možné poskytnout řešení, návrhem změn, zaměřením vývoje či dalšího výzkumu, které mohou pomoci tyto limitace odstranit. Pro vyšší praktickou hodnotu práce proběhlo také několik konzultací s odborníky na zde dotčená témata, kteří nepředložili žádné zásadní námítky či připomínky a nebyly nalezeny žádné právní předpisy, které by znamenaly nemožnost realizace zde představeného návrhu.

Pro praktickou analýzu a případnou implementaci výstupů této práce bude nutno provést další výzkum, který se bude přesněji a podrobněji věnovat jednotlivým problematikám představeným především v kapitolách 2 a 3. Konkrétně pak jde například o problematiku udělení letového povolení a koordinaci letu BVLOS v CTR, metody záznamu a případně vyhodnocení obrazu s laserovým svazkem, legislativu upravující společný provoz letadel s osobami na palubě a bezpilotních letadel ve společném vzdušném prostoru, zvýšení spolehlivosti bezpilotních systémů, analýzu historických dat o laserových útocích a jejich uplatnění pro boj proti jejich opakování nebo detailní analýzu přínosů a rizik tohoto systému v porovnání se stávajícím stavem.

Tato práce vznikla na základě požadavku na prozkoumání možností využití bezpilotních prostředků pro zvýšení bezpečnosti leteckého provozu v souvislosti s laserovými útoky, který byl vznesen k Ústavu letecké dopravy Fakulty dopravní zpracovateli projektu APALER, jenž se problematice laserových útoků na letecký provoz věnuje podle požadavků zadavatele projektu – Policie ČR. Věřím, že tato práce bude pro projekt APALER přínosem a umožní jeho zpracovatelům (UNOB a VUT) zvážit praktičnost využití tohoto systému podle zde předložených informací a doručit tak zadavateli komplexní řešení beroucí v potaz všechny možnosti.



## Seznam použité literatury

1. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Laser Hazards*. [online]. 2023. Dostupné také z: <https://explore.dot.gov/t/FAA/views/LaserHazards/Main?%5C%3Aembed=yes#3>. [cit. 2023-11-15].
2. CIVIL AVIATION AUTHORITY. *Safety notice number: SN-2020-017* [Dostupné z: <http://publicapps.caa.co.uk/docs/33/SafetyNotice20201017V2..pdf>]. 2020. [cit. 2023-11-15].
3. CARROLL, James; RICHARDS, Dale. Shining the Light on Public Attitudes Toward Laser Attacks on Aircraft. In: 2018. Dostupné z DOI: 10.2514/6.2018-3512.
4. IATA. *Number of flights performed by the global airline industry from 2004 to 2022, with a forecasts for 2023 (in millions) [Graph]*. 2023. Dostupné také z: <https://www.statista.com/statistics/564769/airline-industry-number-of-flights>. [cit. 2023-11-15].
5. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Laser Incidents* [Dostupné z: <https://www.faa.gov/about/initiatives/lasers/laws>]. 2023. [cit. 2023-11-15].
6. MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. *Předpis L 13*. 2010. Dostupné také z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-13/index.htm>. [cit. 2023-11-15].
7. ICAO. *ECCAIRS Implementation*. [B.r.]. Dostupné také z: [https://www.icao.int/sam/ssp/pages/eccairs\\_implementation.aspx](https://www.icao.int/sam/ssp/pages/eccairs_implementation.aspx). [cit. 2023-11-15].
8. ÚSTAV PRO ODBORNÉ ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD. *Databáze ECCAIRS*. [B.r.]. [cit. 2023-04-20].
9. KALLOS, Efthymios; PALIKARAS, George. Laser attacks against aircraft: Past, present and future. In: 2015, s. 1–1. Dostupné z DOI: 10.1109/PN.2015.7292517.
10. SCHMID, Daniela; STANTON, Neville A. How are laser attacks encountered in commercial aviation? A hazard analysis based on systems theory. *Safety Science*. 2018, roč. 110, s. 178–191. ISSN 0925-7535. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.012>. [cit. 2023-11-15].
11. ČESKO. Zákon č. 40/2009 Sb., trestní zákoník - znění od 1. 7. 2023. 2023. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2009-40>. [cit. 2023-11-15].
12. ČESKO. Zákon č. 49/1997 Sb., o civilním letectví - znění od 1. 7. 2023. 2023. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1997-49>. [cit. 2023-11-15].
13. RASZYKOVÁ, Augustina. *Zjišťování geografické distribuce laserových útoků na letadla*. Praha, 2023. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy. Nепublikováno.





14. KALOSHIN, Gennady; BUDAK, Vladimir; SHISHKIN, Sergey; ZHUKOV, Vladislav. The Effect Of Scattered Radiation On Capabilities Of Laser Beam Guidance. *Light & Engineering*. 2020, s. 110–117. Dostupné z DOI: 10.33383/2020-052.
15. ČESKO. Opatření obecné povahy - znění od 1. 7. 2023. 2003. Dostupné také z: <https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2020/11/20201230162623731.pdf>. [cit. 2023-11-15].
16. ŘLP ČR S.P. *Dronview.rlp.cz*. 2023. Dostupné také z: <https://dronview.rlp.cz/>. [cit. 2023-11-15].
17. IAC ILS RWY 24. In: *Aeronautical information publication*. Řízení letového provozu České republiky, s. p., 2022. [cit. 2023-11-15].
18. ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU ČESKÉ REPUBLIKY, S. P. *Postup při koordinaci letu dronu s provozovatelem letiště a stanovištěm ŘLP*. 2023. Dostupné také z: [https://letejtezodpovedne.cz/vse\\_o LETANI/kde\\_mohu LETAT/koordinace LETISTE](https://letejtezodpovedne.cz/vse_o LETANI/kde_mohu LETAT/koordinace LETISTE). [cit. 2023-11-16].
19. MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. *Předpis L 11*. 2023. Dostupné také z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-11/index.htm>. [cit. 2023-11-16].
20. ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU ČESKÉ REPUBLIKY, S. P. *Vzdušný prostor České republiky*. 2023. Dostupné také z: [https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/enr\\_1\\_cz.html](https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/enr_1_cz.html). [cit. 2023-11-16].
21. *COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems (OJ L 152 11.6.2019, p. 1)*. 2019. Dostupné také z: [http://data.europa.eu/eli/reg\\_del/2019/945/2020-08-09](http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/2020-08-09). [cit. 2023-10-04].
22. SZ DJI TECHNOLOGY CO., LTD. *DJI Dock*. Dostupné také z: <https://enterprise.dji.com/dock>. [cit. 2023-11-16].
23. SZ DJI TECHNOLOGY CO., LTD. *Matrice 350 RTK Worry-Free Basic Combo*. Dostupné také z: <https://store.dji.com/cz/product/m350-rtk-and-dji-care-enterprise-basic?vid=141411>. [cit. 2023-11-16].
24. SZ DJI TECHNOLOGY CO., LTD. *Matrice 30 Series*. Dostupné také z: <https://enterprise.dji.com/matrice-30>. [cit. 2023-11-16].
25. SZ DJI TECHNOLOGY CO., LTD. *Zenmuse XT2*. Dostupné také z: <https://www.dji.com/cz/zenmuse-xt2>. [cit. 2023-10-07].



26. MALEK MURISON. *5 Ways You Can Use PinPoints in Your Drone Operations*. 2022. Dostupné také z: <https://enterprise-insights.dji.com/blog/drone-laser-rangefinder-pinpoints>. [cit. 2023-11-16].
27. STLOUKAL, Bo. *Kvalita ovzduší v okolí letišť během pandemie COVID-19*. Praha, 2022. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav letecké dopravy.
28. AIRBUS CANADA LIMITED PARTNERSHIP. *Aircraft characteristics publication ACP*. 2023. Dostupné také z: <https://eservices.aero.bombardier.com/wps/wcm/connect/eServices/c2bffe9b-86bc-429c-be25-137324538824/A220-ACP-Issue001-00-19Oct2023.PDF?MOD=AJPERES&CVID=oJspvIg&CVID=oJspvIg>. [cit. 2023-11-16].
29. AIRBUS S.A.S. *A320 AIRCRAFT CHARACTERISTICS AIRPORT AND MAINTENANCE PLANNING AC*. 1985. Dostupné také z: [https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2022-02/Airbus-techdata-AC\\_A320\\_0322.pdf](https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2022-02/Airbus-techdata-AC_A320_0322.pdf). [cit. 2023-11-16].
30. BOEING COMMERCIAL AIRPLANES. *737 Airplane Characteristics for Airport Planning*. 2021. Dostupné také z: [https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/737NG\\_REV%20C.pdf](https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/737NG_REV%20C.pdf). [cit. 2023-11-16].
31. CZECH AIRLINES. *A318/A319/A320/A321 Quick reference handbook*. 2015. Nepublikováno.
32. IAC RNP RWY 24. In: *Aeronautical information publication*. Řízení letového provozu České republiky, s. p., 2022. [cit. 2023-11-16].
33. IAC ILS RWY 30. In: *Aeronautical information publication*. Řízení letového provozu České republiky, s. p., 2022. [cit. 2023-11-17].