



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Bc. Martin Kavka

**Simulační nástroj pro odhad rozložení letového provozu**

Diplomová práce

2023



**K621.....Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Martin Kavka**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

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

Název tématu (česky): **Simulační nástroj pro odhad rozložení letového provozu**

Název tématu (anglicky): Simulation Tool for Estimation of Air Traffic Distribution

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je navrhnout a vytvořit SW nástroj, který umožňuje simulovat rozložení rostoucího leteckého provozu nad Evropou na základě dat z aktuální provozní situace a dat z předpovědí provozu, dodržující provozní pravidla a postupy.
- Vývoj letového provozu v Evropě a jeho předpovědi.
- Vstupní zdroje dat letového provozu a parametry aplikované na odhad růstu letového provozu pro různé segmenty vzdušného prostoru.
- Návrh řešení a praktické zpracování simulačního nástroje.
- Porovnání simulovaného výstupu s předpovědí.
- Zhodnocení nástroje a možnosti jeho použití.



- 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: Letecký předpis L 4444: POSTUPY PRO LETOVÉ NAVIGAČNÍ SLUŽBY: USPOŘÁDÁNÍ LETOVÉHO PROVOZU  
RTCA DO-260 Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter ADS-B  
Seven-Year Forecast 2021- 2027 - Forecast per state.  
EUROCONTROL, 2021

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tereza Topková, Ph.D.**  
**Ing. Stanislav Pleninger, 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. Martin Kavka  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 16. května 2023

## Čestné prohlášení

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

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

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

V Praze dne 30.11 2023

.....

Podpis

## **Poděkování**

V první řadě bych rád poděkoval své vedoucí diplomové práce Ing. Tereze Topkové, Ph.D, která mi v průběhu tvorby práce ochotně odpovídala na mé dotazy. Vždy mě byla schopna pomoci s pochopením problematiky a nalezením správných řešení. Další poděkování patří mým rodičům a rodině, kteří mě podporovali při mém vysokoškolském studiu a byli mojí oporou. V neposlední řadě bych také rád poděkoval všem svým kamarádům a přátelům za jejich podporu a pomoc při studiu.

## Seznam zkratek

**EUROCONTROL** - (European Organisation for the Safety of Air Navigation) – Evropská organizace pro bezpečnost letového provozu

**IATA** – (International Air Transport Association) - Mezinárodní asociace leteckých dopravců

**ICAO** – (International Civil Aviation Organization) - Mezinárodní organizace pro civilní letectví

**FAA** – (Federal Aviation Administration) - Federální letecká správa

**SSR** – (Secondary Surveillance Radar) - Sekundární přehledový radar

**ADS-B** – (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) – Automatický závislý přehled - vysílání

**GNSS** – (Global Navigation Satellite System) - Globální družicový polohový systém

**HDBSCAN** – (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) - Prostorové clusterování na základě hierarchické hustoty se šumem

**GMM** - (Gaussian Mixture Model) - Gaussovský model směsi

**FIR** – (Flight Information Region) - Letová informační oblast

**UIR** – (Upper Information Region) - Horní informační oblast

**ISO** – (International Organization for Standardization) - Mezinárodní organizace pro normalizaci

**ECEF** – (Earth-Centered, Earth-Fixed) - Země-střed, Země-fixní.

**RMSE** – (Root-Mean-Square Error) - Střední kvadratická chyba

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá vývojem softwaru pro vizualizaci současné a předpovídané letecké dopravy. Software, implementovaný v programovacím jazyce Python ve vývojovém prostředí PyCharm, využívá reálná data o leteckém provozu z OpenSky Network. Metodologie zahrnuje clusterování historických souborů dat letového provozu pomocí různých clusterovacích algoritmů a Gaussovský model směsi ke generování nebo odstraňování letadel z letového provozu, doplněné vizualizačními nástroji. Výsledný software umožňuje vizualizaci historických dat o letecké dopravě a umožňuje uživatelům zvyšovat a snižovat letový provoz a sledovat odpovídající vizualizaci rozložení letového provozu. Tato práce přispívá k vyvíjejícímu se prostředí analýzy a vizualizace vývoje letového provozu a umožňuje simulovat budoucí provoz pro potřeby dalšího výzkumu.

## **Klíčová slova**

Cluster, GMM, HDBSCAN, K-means, Python, OpenSky Network, Letový provoz, Distribuce, Předpověď

## **Abstract**

This work deals with the development of software for the visualization of current and predicted air traffic. The software, implemented in the Python programming language in the PyCharm development environment, uses real air traffic data from the OpenSky Network. The methodology includes clustering of historical air traffic data sets using various clustering algorithms and a Gaussian mixture model to generate or remove aircraft from air traffic, complemented by visualization tools. The resulting software enables the visualization of historical air traffic data and allows users to increase and decrease flight traffic and observe the corresponding visualization of the air traffic distribution. This work contributes to the evolving landscape of air traffic evolution analysis and visualization and opens avenues for future research and development in this area.

## **Key words**

Cluster, GMM, HDBSCAN, K-means, Python, OpenSky Network, Air traffic, Distribution, Forecast



## Obsah

1	Úvod .....	11
2	Analýza současného stavu.....	12
2.1	Předpověď provozu.....	12
2.1.1	Zdroje dat pro vytváření předpovědí letového provozu .....	13
2.1.2	Přesnost předpovědí .....	22
2.1.3	Mimořádné události.....	22
2.1.4	Aktuální předpovědi.....	30
2.2	Problematika sledování letového provozu.....	33
2.2.1	Datové zdroje pro sledování letadel.....	33
2.3	Clusterování .....	38
2.3.1	Clusterovací metody.....	39
3	Metodika.....	43
3.1	Tvorba Softwaru.....	43
3.1.1	Získávání, načítání a filtrování dat .....	44
3.1.2	2D vizualizace a prostorové ověření dat .....	47
3.1.3	Zpracování vzdušných prostorů.....	49
3.1.4	Prostorové ověřování dat s reálnými prostory.....	53
3.1.5	Vizualizace reálných prostorů s reálnými daty .....	57
3.1.6	Tvorba národních vzdušných prostorů .....	58
3.1.7	3D vizualizace .....	62
3.1.8	Clusterování a generování nového letového provozu .....	64
3.2	Validace.....	71
4	Výsledky .....	76
5	Diskuse .....	79
6	Závěr .....	81
7	Seznam obrázků.....	82

---

8	Seznam tabulek.....	84
9	Bibliografie .....	85

# 1 Úvod

Předpovídání letového provozu je jedna z nejdůležitějších částí při řízení letového provozu. Schopnost systematicky se připravit na nadcházející letový provoz zásadním způsobem přispívá k jeho stabilitě a efektivitě. S rostoucím množstvím letového provozu je nutné využívat kapacity vzdušných prostorů a kapacity v rámci poskytování navigačních služeb mnohem efektivněji. Předpovídání letového provozu se zakládá na analyzování procentuálních změn objemu letového provozu. Využitím těchto předpovídaných hodnot lze provést komplexnější analýzu letového provozu. Zatímco procentuální ukazatel nárůstu či poklesu poskytuje obecný pohled na vývoj letecké aktivity na celostátní úrovni, metoda clusterování, což je technika strojového učení, umožňuje detailnější zkoumání vývoje letového provozu uvnitř jednoho státu. Analýzou současné distribuce letového provozu je možné odvodit možné budoucí rozložení letového provozu, vycházející z aktuálního stavu. Vizualizace tohoto očekávaného rozložení letového provozu by mohla poskytnout podrobnější pohled na předpovídaná data a umožnit efektivnější přípravu na blížící se letový provoz. Tato diplomová práce se věnuje předpovědím letového provozu a možných využití strojového učení na vizualizace těchto předpovědí. Cílem této práce je vytvoření programu, který bude schopný generovat možný budoucí letový provoz a následně ho také vizualizovat.

## 2 Analýza současného stavu

V rámci analýzy současného stavu byly detailně zkoumány klíčové aspekty předpovědi letového provozu, sledování letového provozu a clusterování. Oblast předpovědi letového provozu byla zaměřena nejen na stávající metody, ale i na jejich přesnost v rychle se rozvíjejícím prostředí letecké dopravy. Při řešení problematiky sledování letového provozu bylo podrobněji zkoumáno několik typů zařízení, která shromažďují data o letovém provozu. V rámci analýzy byla také podrobně zkoumána oblast clusterování, kde bylo mapováno obecné chápání clusterování a představeny různé přístupy k této technice.

### 2.1 Předpověď provozu

Předpověď letového provozu hraje významnou roli v oblasti managementu a řízení letového provozu. V evropském prostoru, který je znám svou mnohotvárností a rozmanitostí oddělených vzdušných prostorů, je tato předpověď zvláště klíčová. Z těchto důvodů vzniká řada problémů, z nichž otázka kapacity vzdušných prostorů patří k těm nejvýznamnějším [1].

Poskytovatelé letových služeb mají klíčovou roli při zajišťování bezpečné a efektivní letecké přepravy. K dosažení těchto cílů monitorují kapacitu vzdušného prostoru, což zahrnuje sledování počtu letadel v určitých letových oblastech. Tuto kapacitu lze upravit v závislosti na potřebách letecké dopravy. Avšak změna kapacity vyžaduje finanční zdroje a investice do řídicích letového provozu. Proto je klíčové předpovídat letový provoz na různých úrovních, od jednotlivých vzdušných prostorů až po celou síť leteckých tras, aby se efektivně využily finanční prostředky a uspokojily potřeby přepravy [1].

Omezená kapacita vzdušných prostorů může vést ke zvolení delší letové trasy, což má důsledky na několik klíčových faktorů. Jedním z těchto faktorů je environmentální dopad na atmosféru a klima, což získává stále větší pozornost. Nedávné studie naznačují, že letecká doprava přispívá k 13% světové spotřeby fosilních paliv. Co se týče emisí oxidu uhličitého, letecká doprava představuje 2%, což je relativně nízké ve srovnání s jinými druhy dopravy. Vzhledem k rostoucím cenám fosilních paliv mohou delší trasy ovlivnit konečné ceny letenek, což je důležité z hlediska finanční efektivity [2].

S narůstajícím počtem letů se zvyšuje poptávka po dostupnosti vzdušných prostorů, což má důsledky při volbě optimální letové trasy, cenách letenek a emisí oxidu uhličitého do atmosféry [2].

### 2.1.1 Zdroje dat pro vytváření předpovědí letového provozu

Vytváření předpovědí letového provozu je komplexní proces, který vyžaduje širokou škálu datových zdrojů. Pro tuto práci je klíčové sbírat a zpracovávat různé parametry, které charakterizují letový provoz. Tyto parametry slouží jako vstupy do předpovědního modelu.

Důležité je také rozlišit mezi různými typy předpovědí a jejich časovým horizontem, například krátkodobými a dlouhodobými předpověďmi. Každý typ předpovědi vyžaduje specifická data, a některé parametry mohou mít různý význam nebo váhu v závislosti na konkrétním typu předpovědi. Cílem je tedy vytvářet trendy a předpovědi, aby bylo možné předpovědět vývoj systému v budoucím období, například za měsíc nebo rok.

#### EUROCONTROL

Předpovědi letového provozu nad Evropou jsou zpracovávány několika institucemi, přičemž Evropská organizace pro bezpečnost letového provozu (EUROCONTROL) hraje v tomto procesu klíčovou roli. Jednou z jeho hlavních složek je STATFOR [3], který poskytuje různé typy předpovědí pro evropský vzdušný prostor, jednotlivé země a regiony. Časové rozmezí těchto předpovědí se může také dělit na předpověď několika dalších let, ale i na předpověď dlouhodobou, která se může týkat i několika dalších desetiletí.

Důležitou součástí jsou také pravidelně vydávané týdenní trendy, které poskytují komplexní analýzu. Tyto analýzy zahrnují hodnocení dopravního provozu, tržní segmenty letecké dopravy, ceny ropy a pohonných hmot, udržitelnost letového provozu a zejména reflektují nejnovější události ve světě, které mohou ovlivnit leteckou dopravu [3].

Střednědobé předpovědi poskytují komplexní pohled na budoucí vývoj letového provozu, obvykle na období 7 let. Časový rámec střednědobých předpovědí se může na nějaký čas zkrátit, a to v případech, kdy dojde k mimořádným událostem jako například pandemie nebo válka. Tyto předpovědi kombinují letecké statistiky, ekonomický růst a modely dalších průmyslových faktorů, jako jsou náklady společností v leteckém odvětví, kapacita letišť, počet cestujících, vytížení a velikost letadel. Následně jsou vytvořeny určité scénáře, které ukazují pravděpodobný vývoj letecké dopravy za podmínky splnění určitých podmínek [3].

Jako příklad je možné uvést pandemii covid-19. Ve střednědobé předpovědi letecké dopravy byly vytvořeny určité scénáře podle toho jak se bude vyvíjet očkování populace. Tyto scénáře pak dávají určitý obrázek o letecké dopravě, která je očekávána v nadcházejících letech. Tyto předpovědi jsou standardně vydávány každého půl roku [3].

Dlouhodobá předpověď představuje určité scénáře, jak by mohla letecká doprava vypadat v dalších 30 letech. Do těchto dlouhodobých předpovědí jsou nově přidávána i data ohledně oxidu uhličitého a jeho předpovídaného vývoje. Do těchto předpovědí tak zasahují střednědobé faktory, ale i dlouhodobé faktory. Jedná se například o dlouhodobé vývoje ceny ropy a paliv nebo enviromentální omezení. Existují však určité faktory, které mají moc změnit samotnou leteckou dopravu velice radikálně a to například díky technologickým nebo inženýrským objevům. Například nové typy letadel nebo inovace v přepravě mohou výrazně změnit budoucnost letecké dopravy, a tím odlišit skutečný vývoj od předpovědí [3].

## **IATA**

Mezinárodní asociace leteckých dopravců (IATA) je celosvětovou nevládní organizací, která zpracovává předpovědi letového provozu. Tyto předpovědi se zaměřují na globální úroveň a zohledňují potřeby všech účastníků leteckého odvětví, včetně leteckých společností, provozovatelů letišť, investičních subjektů a vlád. IATA zdůrazňuje, že jejich předpovědi jsou založeny na spolehlivých zdrojích, jako jsou data od leteckých společností a dalších aktérů v odvětví. Tyto předpovědi zahrnují mapy působnosti a analýzu konkurenční situace. Dále se opírají o ekonometrické modely s různými scénáři. Důležitou součástí je také prospektivní analýza prostředí letišť, krátkodobé projekce (bottom-up projections) a rozvoj leteckých služeb [4].

Při tvorbě specifických regionálních nebo událostmi spojených předpovědí se do analýz zahrnují další data a analýzy. Například při předpovídání provozu během pandemie jsou brány v úvahu údaje o očkování a další faktory, které ovlivňují počet cestujících [5].

Důležité je upozornit, že IATA se nezaměřuje pouze na provoz, ale také na předpovědi týkající se počtu pasažérů a nákladů. Množství letecké dopravy je těsně spojeno s těmito dvěma faktory, a proto jsou vytvářeny také předpovědi týkající se samotného letového provozu [4] [5] [6].

## ICAO

Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO) aktivně přispívá k tvorbě leteckých předpovědí, podobně jako IATA. Tyto předpovědi se týkají množství cestujících a nákladů a pokrývají celosvětový provoz, stejně jako jednotlivé země a regiony. ICAO též poskytuje předpovědi ohledně konkrétních letišť, odletů a příletů a dalších aspektů letového provozu [7].

ICAO využívá podobná vstupní data jako IATA, což zahrnuje historické údaje o leteckém provozu z různých zdrojů. Tato data jsou harmonizována z různých zdrojů, včetně statistik publikovaných národními úřady a dalšími subjekty v leteckém odvětví. Výsledná statistická sada pokrývá 90 % mezinárodní přepravy cestujících a 95 % nákladní dopravy [7].

Kromě statistických dat ICAO organizace využívá při zpracovávání předpovědí ekonomická a demografická data. Tyto data pro jednotlivé země získává z IHS Global Insight. Z ekonomických dat jsou pro zpracování předpovědí použita především data týkající se reálného hrubého domácího produktu nebo údaje o reálné ceně ropy. Při analýze ekonomických údajů se sleduje několik parametrů, včetně historických a současných hodnot, růstu reálného hrubého domácího produktu a jeho projekcí. Podobně je to i s reálnými cenami ropy, kde se zkoumají historické ceny, jejich vzestupy a odhadované budoucí ceny ropy [7].

ICAO používá různé časové horizonty ve svých předpovědích. Konkrétně se jedná o krátkodobé předpovědi (do 1 roku), střednědobé předpovědi (1-5 let) a dlouhodobé předpovědi (nad 5 let) [7].

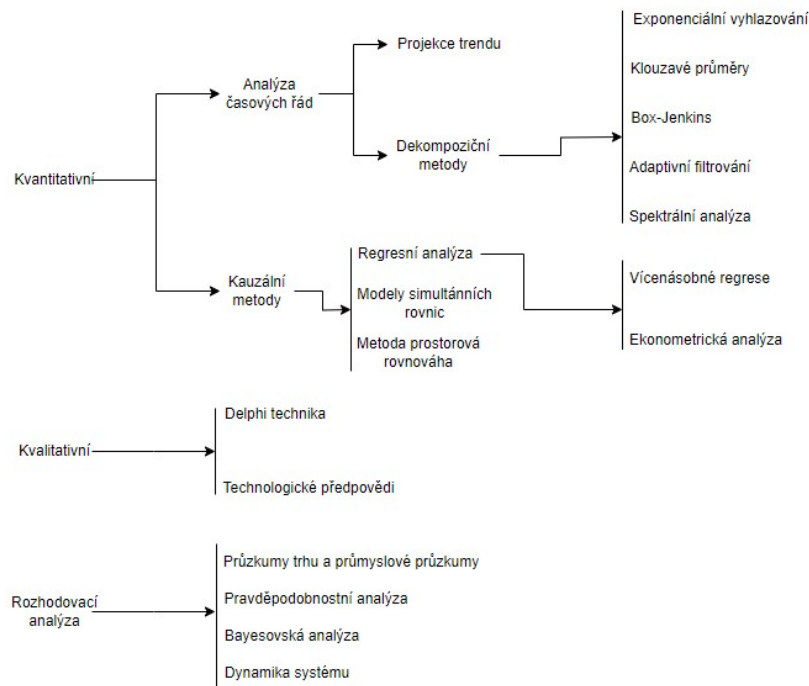
### Metodika zpracování předpovědí

Rozhodujícím aspektem při vytváření předpovědí letecké dopravy je pečlivé zvažování zamýšleného využití těchto předpovědí. V rámci leteckého průmyslu se předpovědi mohou lišit v závislosti na konkrétním časovém horizontu a odvětví. Způsob a detaily předpovědi jsou stanoveny v souladu s jejím plánovaným použitím [7].

V oblasti civilního letectví mají předpovědi významnou roli především v těchto kontextech:

1. Podpora státního rozvoje letecké dopravy a plánování vzdušného prostoru, což zahrnuje řízení letového provozu, letové trasy a infrastrukturu letišť.
2. Plánování vybavení, zařízení a tras pro letecké společnosti.
3. Plánování budoucích typů letadel a jejich vývoj pro výrobce letadel.

Vývoj a analýza předpovědí letecké dopravy se opírá o různé metodologie, včetně kvantitativních (matematických), kvalitativních (úsudkových) a rozhodovacích analýz [7].



Obr. 1 Rozdělení metod [7]

Kategorie kvantitativních metod předpovědi je zakotvena v analýze historických dat, která jsou systematicky shromažďována v průběhu určitého časového období. Získaná data jsou následně použita pro vytvoření a vyhodnocení předpovědi letového provozu [7].

Naopak, kategorie kvalitativních metod předpovědi vstupuje do hry v případech, kdy neexistuje dostatek dostupných historických dat nebo kvalita těchto dat je nedostatečná. V takových situacích se vytváření předpovědi stává závislým na zkušenostech a odborném úsudku analytiků.

Výsledky ukazují, že pro dosažení maximální přesnosti předpovědi letového provozu je nejefektivnější využívat kombinaci více metod. Tímto přístupem lze generovat širší spektrum možných předpovědí, které následně vyžadují konsolidaci na základě odborného úsudku a zkušeností [7].

## Kvantitativní metody předpovědi

Kvantitativní metody mohou být dále rozděleny do dalších dvou skupin:

- Analýza časových řád
- Kauzální metody



Některé z široce užívaných technik v těchto dvou podkategoriích využívají projekce trendů, metody rozkladu a regresní analýzu [7].

### **Analýza časových řád**

Metoda analýzy časových řad je založena na předpokladu, že historické vzorce chování budou platit i nadále, a tím pádem se jedná o metodu silně závislou na historických datech, která slouží jako základ pro tvorbu předpovědí.

V rámci analýzy časových řad se tato metodika dále člení do dvou podkategorií: projekce trendu a dekompoziční metoda. U předpovídání letového provozu ve středním a dlouhém časovém horizontu je významným faktorem studium historických dat. Pro střednědobé a dlouhodobé předpovědi letecké dopravy je klíčové oddělit predikce od krátkodobých výkyvů [7].

Při analýze trendu ve vývoji letecké dopravy v rámci střednědobých a dlouhodobých předpovědí se opíráme o předpoklad, že faktory ovlivňující předpovědi letecké dopravy budou v budoucnosti působit na základě stejných pravidel a charakteristik, jaké jsou pozorovány v historických datech. Tento postup předpokládá určitou stabilitu a relativní konstantnost v systému. V praxi to zahrnuje analýzu historických dat graficky, což umožňuje identifikovat a monitorovat vývoj jednotlivých parametrů a letecké dopravy obecně v čase [7].

Po identifikaci trendu ve vývoji letecké dopravy je následně možné přiřadit křivce trendu určité funkční formy, jako jsou lineární, exponenciální, parabolické nebo Gompertz. Každá z těchto potenciálních funkcí odhaluje odlišný vývoj letecké dopravy, jak z hlediska koncových hodnot, tak vzhledem k průběhu [7].

Dekompoziční metoda, naopak, vychází z principu rozkladu jednoho komplexního problému na několik elementárních komponentů. Tento přístup může být užitečný například při roční předpovědi letového provozu, protože provoz letecké dopravy vykazuje sezónní změny v závislosti na ročním období. V tomto kontextu můžeme zkoumat provoz v rámci jednotlivých období nebo cyklů [7].

V rámci dekompoziční metody se uplatňuje široké spektrum technik a postupů, které slouží k zdokonalení předpovědí letového provozu. Tyto techniky a postupy zahrnují exponenciální vyhlazování, klouzavý průměr, metodu Box-Jenkins, adaptivní filtrování a spektrální analýzu. Tyto techniky umožňují hladký průběh dat a předpovědí, a zároveň poskytují možnosti pro zpracování složitých datových sad. Konkrétní techniky se vybírají v závislosti na použitých datech pro tvorbu předpovědi a na konkrétním cíli dané předpovědi provozu letecké dopravy [7].

## Kauzální metody

Kauzální metoda představuje postup, který následuje vývoj trendů založený na historických růstových trendech. Tyto růstové trendy jsou získávány z historických dat o provozu letecké dopravy. Předpovědi odvozené z faktorů ekonomických, sociálních a provozních, které ovlivňují leteckou dopravu, nabízejí alternativu k předpovědím založeným na analýze časových řad.

Kauzální metody sledují a rozkrývají vztahy příčiny a důsledku. Úspěšné použití této metody umožňuje předpovídat nejen nárůst, ale i pokles na trhu. Postup kauzální metody spočívá v analýze vztahů mezi závislými a nezávislými proměnnými a zjišťování, jak pohyby těchto proměnných ovlivňují vzájemné vztahy mezi nimi [7].

V rámci kauzální metody zpracování předpovědí provozu letecké dopravy lze identifikovat tři hlavní podkategorie. První z nich je regresní analýza, druhá se týká modelů simultánních rovnic a třetí je zaměřena na modely prostorové rovnováhy [7].

Regresní analýza patří mezi nejčastěji používané metody předpovídání provozu letecké dopravy. Tato metoda se nezakládá pouze na historických datech, ale také na dalších proměnných, které mají kauzální souvislosti. Regresní analýza využívá ekonometrické analýzy a analýzy elasticity poptávky. Tyto techniky se zaměřují na finanční data, jako jsou příjmy v různých regionech nebo ceny paliv a cateringových služeb. Analyzují vztahy mezi těmito ekonometrickými daty a následně je využívají při tvorbě předpovědí letového provozu [7].

Některé ekonomické modely představují soubor rovnic, které zároveň ovlivňují jednotlivé proměnné. Těmto modelům se říká "modely simultánních rovnic" a nazývají se tak, protože jejich proměnné splňují všechny tyto rovnice najednou. Tyto modely se zaměřují na problematiku poptávky a nabídky v rámci ekonomických souvislostí. Podobně jako u regresní analýzy, i zde je třeba určit funkční tvar každé rovnice, odhadnout hodnoty parametrů a provést statistickou analýzu významnosti výsledků a platnosti předpokladů [7].

Modely prostorové rovnováhy se zabývají analýzou pohybu letecké dopravy mezi různými dopravními centry a regiony. Tyto modely vytvářejí matematické vztahy, které spojují množství dopravy s charakteristikami regionů a vzájemnou vzdáleností mezi těmito regiony. Základní forma těchto vztahů uvádí, že množství dopravy je přímo úměrné charakteristikám regionů a nepřímo úměrné vzdálenosti mezi těmito regiony [7].

## **Kvalitativní metody předpovědí**

Všechny dosud zmiňované metody zpracování předpovědí mají společný základ v dostupnosti historických dat a v metodě vytváření předpovědí na základě těchto dat. Naopak, kvalitativní metody předpovědí nacházejí své uplatnění v situacích, kdy historická data nejsou dostupná nebo jsou nedostatečná. Tyto metody mohou být použity i pro zkoumání vlivu nových technologií nebo nových interních a externích faktorů na předpovězené scénáře. Jednou z významných nevýhod těchto metod spočívá v jejich nedostatečné definici, což je důsledkem povahy, na níž jsou tato rozhodnutí zakládána. Kvalitativní metody předpovědí zásadně spoléhají na intuici a jsou významně závislé na odborném úsudku jednotlivých expertů. Jejich použití se často uplatňuje při predikci významných změn v historických vzorcích nebo v situacích, kdy dostatečná historická data nejsou k dispozici. Těchto metod se často využívá na základě názorů a úsudků odborných expertů [7].

### **Delphi technika**

Metoda Delphi představuje jedinečný přístup k tvorbě předpovědí v oblasti letecké dopravy. Tato metoda je založena na principu konsolidace názorů, která spočívá ve sblížení různých perspektiv na budoucí vývoj. Proces metody delphi je rozdělen do dvou hlavních kroků. Prvním krokem je distribuce dotazníků kvalifikovaným respondentům, kteří mají hluboké znalosti o letecké dopravě. Respondenti jsou vyzváni, aby vyjádřili své představy o nejpravděpodobnějším vývoji letecké dopravy v určitém časovém období. Druhým krokem je analýza těchto odpovědí a vytvoření syntetického obrazu budoucího stavu, ke kterému se všechny dotazníky přibližují. Následně jsou všichni respondenti konfrontováni s touto finální verzí, která vznikla na základě syntézy všech dotazníků, a mají možnost přehodnotit své vlastní názory na základě převažujícího konsensu [7].

### **Technologické předpovídání**

Metoda technologického předpovídání představuje další kvalitativní přístup k prognózám v oblasti letecké dopravy. Samotný název metody by mohl vést k mylným dojmům, neboť technologické předpovídání se věnuje predikci různých aspektů budoucnosti, a to nejen ve vztahu k technologickému pokroku. Cílem této metody je generovat nové poznatky ohledně budoucích systémů a výkonnosti, které mohou zahrnovat jak vysvětlující informace, tak i spekulativní scénáře. Hlavním úkolem těchto informací je přinést nové perspektivy a vhledy do

potenciálního budoucího vývoje v konkrétních technologických oblastech a rozšířit pochopení možných očekávání [7].

Technologické předpovídání lze rozdělit do dvou hlavních kategorií: explorativní a normativní.

Explorativní technika vychází ze současné situace, dostupných technologií a znalostí k celkovému zhodnocení budoucích podmínek.

Naopak, normativní technika zvolí opačný přístup, začíná analýzou budoucích cílů, kterých je třeba dosáhnout, a následně retrospektivně zkoumá všechny nutné kroky a pokroky, které jsou nezbytné k dosažení těchto budoucích cílů [7].

### **Metoda rozhodovací analýzy**

Rozhodovací analýza představuje komplexní metodu, která spojuje jak kvantitativní, tak kvalitativní aspekty při tvorbě prognóz. Tato metoda závisí na úsudku odborníka v konkrétní oblasti, jehož znalosti a zkušenosti jsou klíčovými faktory pro stanovení budoucího vývoje.

V rámci rozhodovací analýzy analytik kombinuje subjektivní úsudek s objektivními statistickými a matematickými daty, včetně pravděpodobnostních hodnot. Tato metoda je zvláště užitečná při zohledňování nejistoty a analýze rizik.

Příklady předpovídání, které spadají do této kategorie, zahrnují tržní a průmyslový výzkum, Bayesovskou analýzu, pravděpodobnostní analýzu a analýzu dynamiky systémů. Tyto metody pomáhají analytikům zkoumat a modelovat různé faktory ovlivňující budoucí vývoj a hodnotit jejich dopady na leteckou dopravu [7].

### **Průzkum trhu a průmyslové průzkumy**

Technika průzkumu trhu a průmyslu je zaměřena na komplexní analýzu tržních charakteristik v oblasti letecké dopravy. Tímto přístupem se sleduje empirické zkoumání rozdílů využívání letecké dopravy mezi různými segmenty populace a průmyslovými odvětvími. Integrací těchto zjištěných charakteristik do předpovědí, spolu s proměnnými socioekonomického kontextu, lze získat perspektivní vzhled do budoucího vývoje a směřování letecké dopravy.

Jinými slovy se jedná o metodu, kdy je zkoumaný určitý region nebo specifická země. V této zemi je analyzována nákladní a osobní letecká doprava. Zkoumá se jaké skupiny obyvatel a průmyslové sektory využívají letecké dopravy, jak je rozložený import a export dané země. Následně už se pouze pohlíží na

pravděpodobnost, že dojde ke změně v budoucnosti nebo se na této situaci nic měnit nebude [7].

### **Pravděpodobnostní analýza**

Předpovídání provozu letecké dopravy je náročný proces, který v sobě nese prvky pravděpodobnosti. V rámci tohoto procesu je možné vytvořit rozmanité předpovědi, z nichž každá má přiřazenou určitou pravděpodobnost výskytu. Pokud se setkáváme s vysokou mírou nejistoty, je žádoucí implementovat konkrétní rámec pro přiřazování těchto pravděpodobností jednotlivým předpovědím.

V této analytické proceduře jsou pravděpodobnosti přiřazovány každé předpovědi v rozsahu mezi 0 a 1, přičemž hodnota 0 naznačuje, že daná předpověď je nemožná a nemůže se uskutečnit, zatímco hodnota 1 indikuje absolutní jistotu, že předpověď se stane.

Tímto způsobem určení pravděpodobností pro jednotlivé předpovědi je možné nakonec definovat nejrealističtější výsledky. Nicméně je třeba poznamenat, že použití heuristických nebo pravděpodobnostních metod pro předpovídání poptávky v oblasti letecké dopravy je spojeno s určitými omezeními [7].

### **Bayesovská analýza**

Prognózy založené na subjektivních odhadech pravděpodobnosti vyžadují aplikaci analytického modelu. Tento konkrétní model je obecně označován jako Bayesovská analýza.

Bayesovská analýza je metoda, která se zaměřuje na zdokonalení prognózy za pomoci nových dat. Tato metoda operuje na základě logiky zkoumání určitého systému. Začátek analýzy spočívá v práci s počátečními daty, ale následně dochází k postupnému zdokonalování výstupů prostřednictvím inkorporace nových dat, či dat, která již byla zaznamenána. Bayesovská analýza tak využívá průběžného aktualizování informací pro dosažení co nejpřesnějších prognóz [7].

### **Metoda systémové dynamiky**

Metoda systémové dynamiky představuje komplexní analytický přístup založený na rozsáhlých počítačových simulacích, v nichž jsou využívány sofistikované matematické modely, vzorce a algoritmy. Tato metoda se opírá o vytvoření komplexního simulačního modelu zkoumaného systému, v tomto kontextu letecké dopravy v určité zemi nebo regionu. Simulace následně umožňuje generovat předpovědi na základě změn v různých parametrech a jejich vzájemných vlivech.

Systémová dynamika se zaměřuje na modelování širokého spektra parametrů, kde každá změna v těchto parametrech ovlivňuje ostatní prvky v systému. Analytik tak může provádět simulace, kde mění určité parametry, například poptávku po letecké dopravě, a pozorovat dopady těchto změn na celý systém. Výsledkem je možnost generovat předpovědi provozu letecké dopravy na základě různých scénářů a změn v systému. Tímto způsobem můžeme získat vhled do toho, jak by se mohl letový provoz vyvíjet za různých podmínek a změn v systému [7].

### 2.1.2 Přesnost předpovědí

Přesnost předpovědí letového provozu závisí na schopnosti určit, do jaké míry se předpovědi shodují s pozdějšími skutečnými výsledky provozu. Každá metoda předpovídání může zahrnovat mechanismy, které hodnotí přesnost a přiřazují váhy jednotlivým předpovědím. Jistým způsobem, zajištění přesnosti předpovědí vyžaduje srovnání predikovaných hodnot s pozorovanými výsledky provozu a následnou analýzu odchylek. Výsledky tohoto srovnání poskytují informace o tom, jak moc se předpovědi od skutečných hodnot liší.

Metody zkoumání přesnosti předpovědí mohou zahrnovat systematické porovnávání skutečných a predikovaných hodnot, a analýzu těchto rozdílů za účelem zlepšení přesnosti předpovědí. Důležitým nástrojem pro hodnocení přesnosti může být i periodické testování, kde jsou v pravidelných intervalech zkoumány predikce a jsou následně porovnávány s aktuálními výsledky provozu. Tato periodická revize umožňuje identifikovat případné chyby a chybějící proměnné v modelu a následně je lze zahrnout do dalšího procesu předpovídání pro zvýšení přesnosti předpovědí [7].

### 2.1.3 Mimořádné události

Mimořádné události zaujímají značné místo v kontextu letecké dopravy, zejména v oblasti jejího předpovídání. Tyto události představují významné faktory, které mohou výrazně ovlivnit leteckou dopravu. Patří sem široká škála situací, které mají významný dopad na různé aspekty letového provozu. Mezi takové události můžeme zařadit zdravotnické krize, které mohou způsobit významné omezení možností cestování a následně ovlivnit poptávku po leteckých službách. Dále sem spadají i ekonomické krize, které vyvolávají podobné efekty na leteckou dopravu, neboť mohou omezit finanční prostředky dostupné pro cestování.

Kritickým prvkem v kontextu mimořádných událostí jsou i situace týkající se bezpečnosti letecké dopravy samotné. Tyto události mohou zahrnovat teroristické

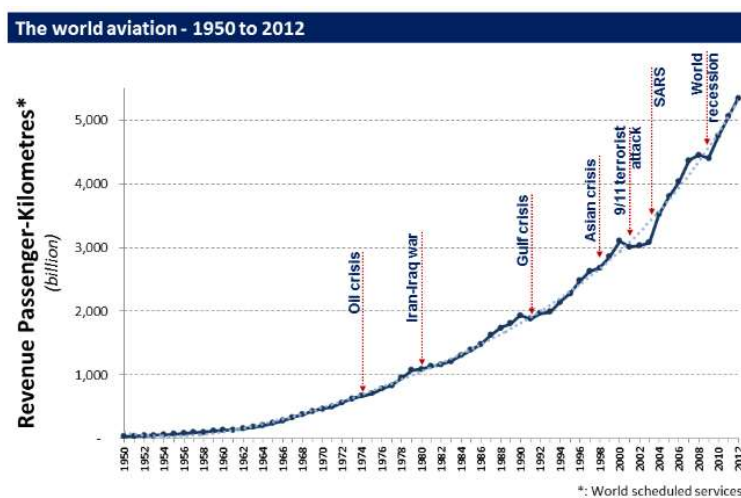
útoky, technické problémy, přírodní katastrofy a další nečekané události, které ohrožují bezpečnost a provozuschopnost leteckého sektoru.

Význam mimořádných událostí v letecké dopravě spočívá v tom, že vyžadují nejen okamžité reakce a opatření, ale také pečlivou prognózu a plánování pro období po jejich skončení. Správné analýzy a předpovědi vztahující se k těmto událostem jsou klíčové pro řízení letecké dopravy, poskytování bezpečnosti pro cestující a minimalizaci ekonomických dopadů na letecký sektor jako celek [8].

Primární nevýhodou mimořádných událostí v rámci letecké dopravy spočívá v jejich nepředvídatelné povaze. Tyto incidenty se většinou vyskytují náhle a nečekaně, což značně komplikuje jejich předvídání a plánování. Představit si, kdy a jaká konkrétní mimořádná událost může nastat, je obtížné, ba téměř nemožné. Ačkoli existuje určitá míra očekávání mimořádných událostí, je nesmírně těžké provést absolutní předpověď o jejich výskytu.

Ještě jedním aspektem, který komplikuje reakci na mimořádné události v letecké dopravě, je obtížnost připravit se na tyto neočekávané situace. Některé typy mimořádných událostí, které mohou mít významný vliv na letový provoz, mohou být opomíjeny nebo považovány za nepravděpodobné, což dále komplikuje plánování a reakci na ně. Příkladem takového scénáře je teroristický útok na Spojené státy dne 11. září 2001, který představoval zcela nepředvídatelnou událost s rozsáhlými dopady na leteckou dopravu.

Tato analýza se snaží poskytnout vhled do reprezentativního vzoru mimořádných událostí, které ovlivnily leteckou dopravu, a zkoumá jejich efekty na tento sektor [8].

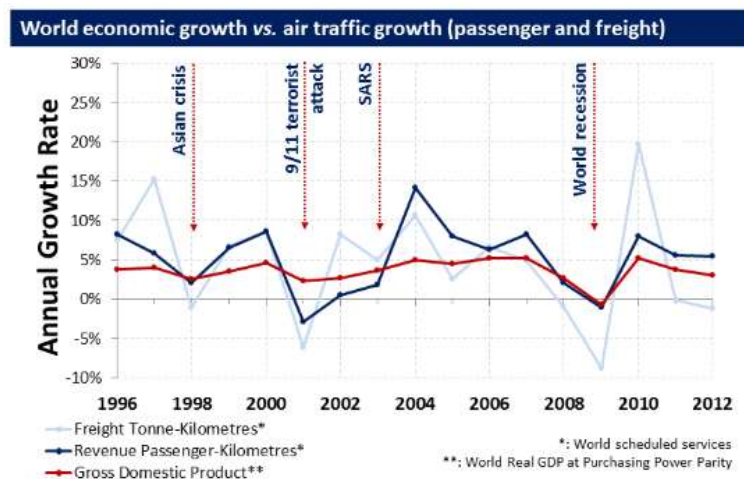


Obr. 2 Časová osa mimořádných událostí [8]

Na výše uvedeném grafu lze vidět dynamiku poptávky po letecké dopravě na trhu. Zřetelně je patrný trend stoupající poptávky po cestování leteckou dopravou, avšak pozoruhodné jsou rovněž interrupce v tomto trendu, včetně období stagnace či poklesu. Tyto období stagnace a poklesu bývají do značné míry spojeny s výskytem mimořádných událostí, které mají významný vliv na leteckou dopravu.

Těmito mimořádnými událostmi jsou především válečné krize, jakými byly například válka mezi Íránem a Irákem, krize v Perském zálivu nebo teroristické útoky z 11. září. Kromě toho se na grafu objevují také ekonomické události, jako byla ropná krize v sedmdesátých letech, asijská finanční krize v roce 1997 či globální hospodářská recese v roce 2008. V neposlední řadě se do tohoto souboru mimořádných událostí řadí i zdravotnické krize, například šíření nákazy SARS a v nedávné době pandemie Covid-19.

Tato komplexní řada mimořádných událostí nepochybně zanechala výrazné stopy na globálním leteckém průmyslu. Jejich dopady se projeví významnými změnami v poptávce po letecké dopravě, což nepochybně představuje výzvu pro aktéry v tomto odvětví, a vyžaduje sofistikované strategie řízení rizik a adaptace na nečekané situace [8].



Obr. 3 Graf trendu letecké dopravy [8]

Na následujícím grafu je zaznamenán roční růst letecké dopravy v průběhu několika let, a tento graf dále ilustruje význačné mimořádné události, které se vyskytly na přelomu tisíciletí. Podobně jako v předchozím grafu, i na tomto grafu lze identifikovat mimořádné události, které vedly k významnému snížení tempa růstu letecké dopravy, v některých případech až do záporných hodnot [8].



Největší pokles růstu letecké dopravy byl zaznamenán v roce 2001 po největším teroristickém útoku v historii Spojených států. Tento útok byl realizován prostřednictvím letecké dopravy, kdy došlo k únosu letadel, která byla následně zneužita jako smrtící zbraně. Tato tragická událost zahrnovala útoky na obě věže Světového obchodního centra a též na budovu Pentagonu. Bezpečnostní opatření v letecké dopravě byla následně razantně posílena a v prvním roce po této tragédii docházelo k markantnímu poklesu růstu letecké dopravy až do záporných hodnot.

Další významnou událostí, která ovlivnila růst letecké dopravy, byla globální ekonomická recese v roce 2008. Tato událost způsobila, že tempo růstu letecké dopravy kleslo na nízké záporné hodnoty.

Základním prvkem, který určuje povahu změn ve vývoji růstu letecké dopravy, je povaha samotné mimořádné události, a také její spojitost s leteckým sektorem. Tato spojitost může vést ke změně ve vzorci růstu, konkrétně k jeho zpomalení, stagnaci nebo dokonce poklesu. Stagnace a zpomalení růstu jsou patrné i v případech jiných mimořádných událostí, jako je například epidemie SARS [8].

AVIATION ACTIVITY	HISTORICAL			FORECAST			PERCENT AVERAGE ANNUAL GROWTH				
	1990	1998	1999	2000	2001	2011	90-99	98-99	99-00	00-01	99-11
<b>U. S./Foreign Flag Carriers</b>											
<u>Total Passengers to/from</u>											
<u>United States (Millions)</u>	84.2	126.6	132.0	137.6	143.4	239.4	5.1	4.2	4.2	4.3	5.1
Atlantic	29.0	46.6	48.9	51.0	53.1	81.3	6.0	5.0	4.3	4.2	4.3
Latin America	26.3	37.6	39.2	40.9	42.7	79.4	4.5	4.2	4.5	4.3	6.1
Pacific	15.1	23.4	24.1	25.2	26.4	48.4	5.3	3.0	4.5	5.0	6.0
Canadian Transborder	13.7	19.1	19.8	20.5	21.2	30.3	4.1	3.7	3.4	3.4	3.6
<b>U.S. Air Carriers</b>											
<u>Enplanements (Millions)</u>											
Domestic	424.1	555.0	576.1	594.8	612.5	880.1	3.5	3.8	3.2	3.0	3.6
International	41.3	53.1	53.3	55.6	58.1	101.7	2.9	0.3	4.4	4.5	5.5
Atlantic	16.1	18.0	19.1	20.0	20.9	32.2	1.9	6.0	4.8	4.5	4.4
Latin America	13.0	21.0	21.9	22.9	23.9	44.4	5.9	4.2	4.5	4.3	6.1
Pacific	12.2	14.1	12.3	12.7	13.3	25.1	0.1	(12.8)	3.6	4.7	6.1
System	465.4	608.1	629.4	650.4	670.6	981.8	3.4	3.5	3.3	3.1	3.8

Tab. 1 Data předpovědi [9]

Zde uvedená tabulka představuje předpovědi v oblasti letecké dopravy formulované v roce 2000 Americkým Federálním úřadem pro letectví (FAA). Tato tabulka zahrnuje historická data o letecké dopravě v období let 1990 až 1999 a doplňuje je predikcemi pro následující desetiletí, tedy období od roku 2000 do roku 2011.

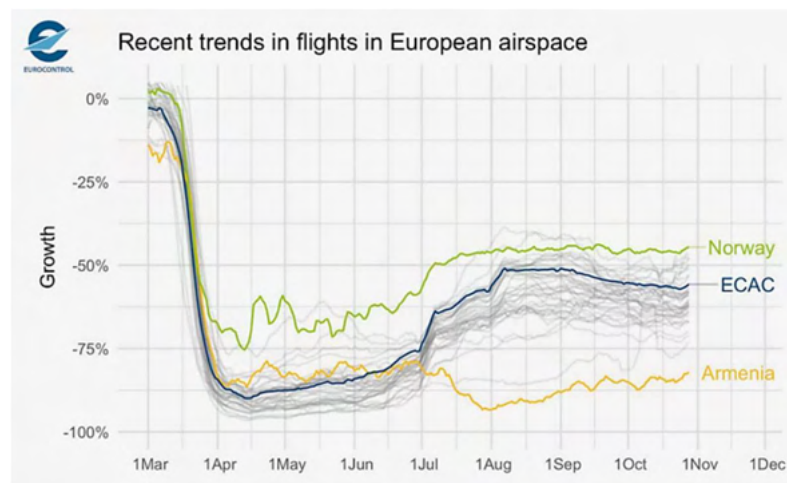
Zajímavým jevem, je fakt, že v roce 2001 byla stále předpokládána tendence růstu v oblasti letecké dopravy a stejně tak pro všechny následující roky. Nicméně v druhé polovině roku 2001 se stal zmíněný teroristický útok a od daného momentu a především v následujícím roce, tedy v roce 2002, došlo k markantnímu poklesu růstu a přechodu do negativních hodnot [9].

Na tomto příkladu je vidět, že předpovědi letecké dopravy přinášejí určité informace ohledně budoucího provozu, avšak tyto předpovědi platí, dokud nedojde k mimořádné události. Poté co mimořádná událost ovlivní leteckou dopravu a především její růstový trend, tak je nutné vytvořit nové předpovědi, které budou brát v potaz danou událost [8] [9].

## Covid-19

Pandemie Covid-19 se v současné době jeví jako významná mimořádná událost, co se týče jejího dopadu na leteckou dopravu. V porovnání s ostatními mimořádnými událostmi, které vedly k mírnému zpomalení nebo poklesu letového provozu, pandemická krize představovala téměř úplné zastavení letecké dopravy. Co tuto událost zvláště vyznačuje, je její globální rozsah, neboť se nejednalo o pandemii s omezeným výskytem v jednom regionu, nýbrž o celosvětovou pandemii.

Zavedená omezení cestování a obava populace z nákazy virem měly za následek významné snížení poptávky po letecké dopravě. I když letový provoz jako celek nebyl zastaven, některé letecké trasy stále fungovaly, zejména pro nezbytnou přepravu. Nicméně osobní letecká doprava významně utrpěla a zažila výrazný pokles [10].



Obr. 4 Procentuální růst letecké dopravy [10]

Na uvedeném grafu jsou prezentovány počty letů nad evropským kontinentem od počátku pandemické krize. V samém úvodu této pandemické situace došlo k výraznému poklesu letecké dopravy, a to průměrně o 90 %. Jednotlivé členské státy Evropské unie reagovaly na tuto krizi různým způsobem, což vedlo k odlišným časovým trajektoriím obnovy letového provozu.

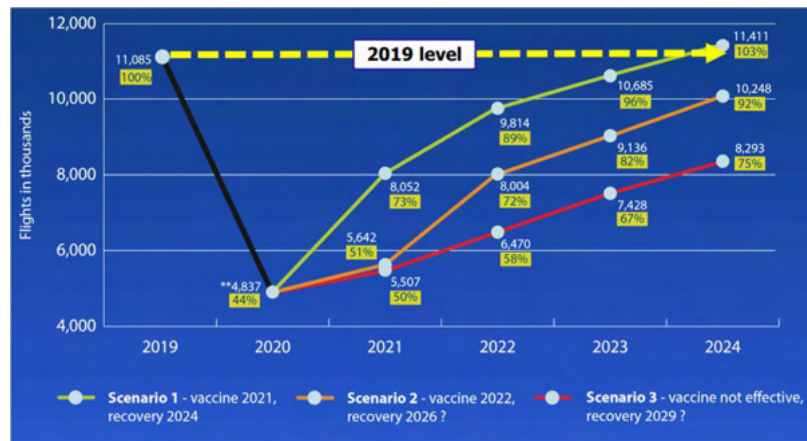
Některé země v Evropské unii zaznamenaly trvajícím pokles letecké dopravy po několik měsíců od začátku pandemie. Naopak jiné země dokázaly rychleji omezit pokles a dosáhnout úrovně provozu, které se přiblížily stavu před pandemií. Například Norsko bylo schopno obnovit letový provoz na úroveň kolem 50 procent provozu před pandemií během relativně krátkého časového horizontu. Ostatní státy Evropské unie následovaly podobnou trajektorii a postupně docházelo ke zvyšování letového provozu [10].

Zvýšení letecké dopravy bylo umožněno díky implementaci opatření, jako je požadavek na testování cestujících nebo podmínka vakcinace. Tyto kroky sehrály významnou roli v procesu obnovy letového provozu v Evropě.

Očkování mělo význačný dopad na leteckou dopravu, neboť většina prognóz týkajících se letového provozu vytvářela scénáře, které závisely na průběhu očkování. Jedním z příkladů je předpověď EUROCONTROL týkající se obnovy letecké dopravy po pandemické krizi, která zahrnuje několik potenciálních scénářů. Tyto scénáře jsou závislé na účinnosti očkování a dodržování pandemických restrikcí [10].

Podle předpovědi EUROCONTROL došlo od roku 2019 do roku 2020 k poklesu letecké dopravy na 44 procent úrovně dopravy z předchozího roku nad evropským kontinentem. Na základě této hodnoty byly vytvořeny tři základní scénáře, které braly v úvahu různý vývoj pandemie a zejména odlišný přístup k dodržování restrikcí a očkování [10] [11].

První scénář v této předpovědi představuje nejoptimističtější variantu. Tento scénář zahrnuje předpoklad dodržování pandemických restrikcí, rychlý rozvoj a široké nasazení vakcín, a s nimi spojené vysoké procento očkované populace. Druhý scénář předpokládá pomalejší vývoj vakcíny, průměrnou míru dodržování pandemických restrikcí a očkování populace. Třetí scénář, naopak, počítá s nejdélším vývojem vakcíny, omezeným dodržováním pandemických restrikcí a nízkým procentem očkované populace [10] [11].



Obr. 5 Graf scénářů předpovědi [11]

Na přiloženém grafu výše jsou zobrazeny tři specifické scénáře v rámci uvedené předpovědi, každý s různými hodnotami a rychlostí návratu letecké dopravy k úrovním zaznamenaným v roce 2019. První scénář naznačuje, že v neoptimističtějších případech by se návrat k úrovni provozu z roku 2019 mohl očekávat kolem roku 2024. V případě druhého a třetího scénáře se tento návrat pohybuje v časovém intervalu mezi lety 2024 a 2029 [11].

Je však důležité zdůraznit, že tato předpověď je založena na historických datech a zahrnuje jisté předpoklady týkající se průběhu očkování a dodržování pandemických restrikcí. Navíc je třeba brát v úvahu možnost dalších nepředvídatelných mimořádných událostí, které by se mohly vyskytnout v průběhu tohoto období a ovlivnit leteckou dopravu a její růst [10] [11].

### Válka na Ukrajině

Válka na Ukrajině lze zařadit mezi mimořádné události, konkrétně se jedná o ozbrojený konflikt, v rámci něhož napadená země ztrácí kontrolu nad svým vzdušným prostorem, což vytváří výrazné bezpečnostní riziko pro leteckou dopravu v dané oblasti. S ohledem na tuto významnou situaci bylo nezbytné přijmout řadu opatření, včetně těch, které ovlivnily civilní letový provoz, včetně opatření spojených s průlety vzdušného prostoru nad Ukrajinou.

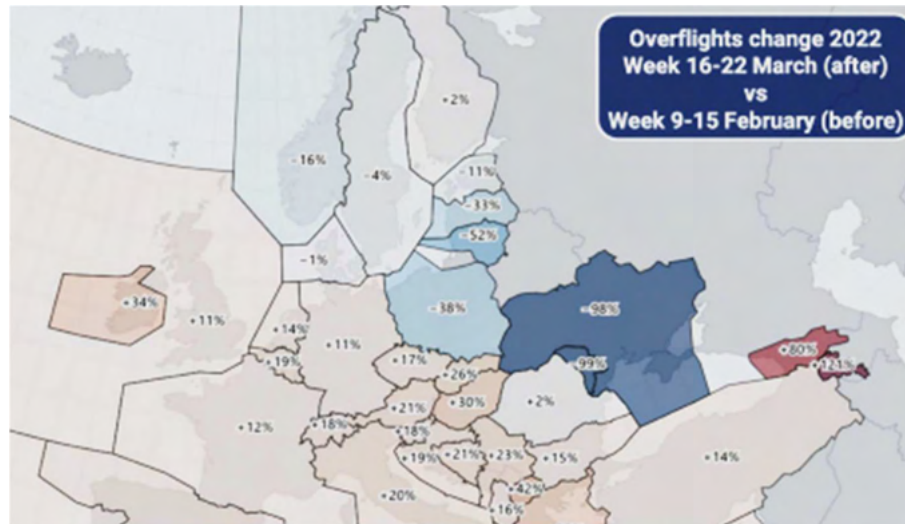
Na uvedeném obrázku níže je pozorovatelné, že vzdušný prostor nad Ukrajinou z hlediska civilního letectví zůstává prakticky nevyužitý. Tato situace je důsledkem zvýšeného rizika spojeného s probíhajícím ozbrojeným konfliktem v této oblasti, které vytváří nepříznivé podmínky pro provoz civilního letectví. V důsledku těchto vysokých rizik byl letový provoz přeměřován a vyhýbá se tak vzdušnému prostoru nad Ukrajinou [13].



Obr. 6 Obrázek provozu na Evropou [12]

Tato změna v leteckém provozu zároveň přináší zvýšený provoz v okolních leteckých prostorech v Evropě. Situace je dále komplikována faktem, že pandemická krize způsobila významný pokles počtu letů a cestujících, což vedlo k finančním obtížím v leteckém průmyslu a následně k personálním úpravám u leteckých společností, včetně personálního zúžení pilotů a palubního personálu [13].

Toto omezení personálu se týká také poskytovatelů letových služeb, kteří museli reagovat na sníženou poptávku po letových službách během pandemické krize. S postupným zlepšováním situace a nárůstem poptávky po kapacitě vzdušného prostoru se však objevuje potřeba dalšího personálu pro řízení letového provozu a poskytování letových služeb. Konflikt na Ukrajině pak přinesl další vrstvu komplikací, kdy celý vzdušný prostor nad touto oblastí byl a je nepoužitelný z bezpečnostních důvodů [13].



Obr. 7 Procentuální změny provozu [13]

Na uvedeném obrázku lze pozorovat výrazné snížení civilního letového provozu nad Ukrajinou a Moldavskem, téměř na úroveň nulového využití jejich vzdušného prostoru. Tato situace výrazně ovlivňuje trasování letadel, která nyní nuceně vyhýbají těmito oblastem a hledají alternativní trasy v rámci Evropy.

Zároveň je patrné, že některé země v jižním, středním a západním regionu Evropy zaznamenávají zvýšený letový provoz, což zahrnuje zejména Itálii a státy na Balkánském poloostrově. Tyto země vykazují až 30% nárůst provozu ve srovnání s běžnými hodnotami.

Z analyzovaných údajů rovněž vyplývá, že došlo k výraznému zpomalení leteckého průmyslu v některých státech východní Evropy. Tato situace je způsobena sníženým zájmem cestujících o cesty do těchto zemí, které jsou v blízkosti oblasti vojenského konfliktu. Příkladem jsou země Pobaltského regionu, kde pokles počtu letů dosahuje hodnot od 11% do 52%. Dalším příkladem může být Polsko, kde se snížil letový provoz o 38% [13].

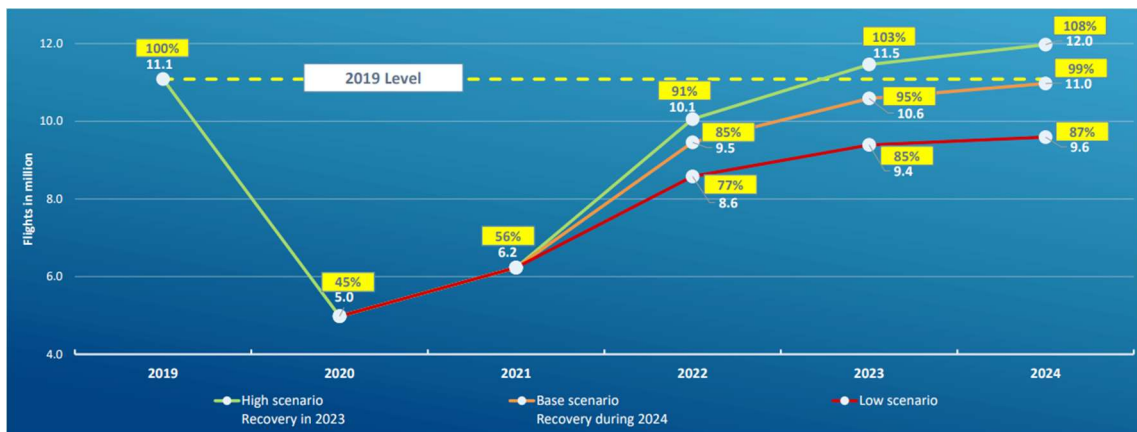
Významným důsledkem konfliktu na Ukrajině je globální dopad, který se projevuje v mnoha sférách. Z hlediska letecké dopravy je však jeho vliv výrazně patrný na evropském kontinentu. Mimořádné události mohou mít významný dopad na letový provoz, a to jak v celém rozsahu, tak i na regionální úrovni [13].

#### 2.1.4 Aktuální předpovědi

Kapitola věnovaná předpovědím vyžaduje také zhodnocení současných prognóz, které byly zpracovány několika významnými organizacemi, konkrétně EUROCONTROL, Airbus a Federální letecká správa. Je třeba poznamenat, že organizace jako IATA a ICAO poskytují své dlouhodobé předpovědi za poplatek

vyšších finančních hodnot. V rámci aktuálních předpovědí došlo k analýze pouze krátkodobých a střednědobých výhledů.

Krátkodobá předpověď od EUROCONTROLu [14] na období 2022-2024 indikuje, že letový provoz v roce 2022 dosáhl 80 % úrovně provozu z roku 2019. Tato prognóza zahrnuje analýzu ekonometrických faktorů, jako je růst hrubého domácího produktu, a další proměnné ovlivňující průběh pandemické krize. V rámci této předpovědi jsou také zohledněny obavy ohledně možných nových variant viru covid-19. Dalším signifikantním faktorem, který byl do této prognózy začleněn, je vojenský konflikt na Ukrajině. Je důležité poznamenat, že tento konflikt má dopady na další klíčové parametry, zejména na ukazatele hrubého domácího produktu [14].



Obr. 8 Předpovědi se scénáři [14]

Při analýze představených scénářů, které lze pozorovat na přiloženém grafu, je patrné, že každý z těchto scénářů operuje za specifických podmínek, které musejí být splněny, aby mohly být realizovány [14].

První scénář, nejoptimističtější z nich, předpokládá, že nedojde ke zhoršení pandemické situace a nebudou zavedeny žádné cestovní restriktce. Mezi další podmínky tohoto scénáře patří vysoká důvěra cestujících v bezpečnost letecké dopravy z hlediska zdravotních rizik, rychlá obnova pracovní síly a kapacit leteckých společností. V kontextu vojenského konfliktu na Ukrajině je též klíčovým faktorem nepřítomnost značného zvýšení cen ropy, pohonných hmot a dalších nezbytných produktů pro provoz letecké dopravy. Pokud všechny tyto podmínky budou splněny, očekává se návrat letecké dopravy na úroveň roku 2019 již během roku 2023 [14].

Druhý scénář představuje situaci, kdy je pandemická krize zvládnuta a cestovní restriktce jsou minimální nebo zcela odstraněny. Důvěra cestujících v bezpečnost

letecké dopravy a absence obav ohledně zdravotních rizik spojených s covid-19 jsou klíčovými faktory. I tento scénář je ovlivněný cenami ropy, pohonných hmot a dalšími produkty nezbytnými pro leteckou dopravu. V tomto případě se předpokládá, že návrat na úroveň provozu z roku 2019 bude dosažen během roku 2024 [14].

Třetí a nejméně optimistický scénář je relevantní v situaci, kdy se objeví nové a agresivnější varianty covid-19, a kdy jsou zavedeny rozsáhlé cestovní restriktce. V tomto scénáři je důvěra cestujících v leteckou dopravu nízká a existují vysoké obavy ohledně zdravotních rizik spojených s cestováním touto formou dopravy. V kontextu válečného konfliktu na Ukrajině je rovněž důležitým faktorem značný nárůst cen ropy, pohonných hmot a energie, což by mohlo způsobit, že cestující si nebudou moci dovolit leteckou dopravu. V tomto nejpesimističtější scénáři se předpokládá, že návrat na úroveň provozu z roku 2019 bude dosažen až během roku 2027 [14].

V krátkodobé předpovědi je zaměření na řadu rizik, která mohou výrazně ovlivnit letový provoz v následujících letech. Tato rizika zahrnují vysokou inflaci, což může mít důsledky na cenovou dostupnost letecké dopravy, a zároveň i zvýšenou míru nejistoty způsobenou Ruskou invazí na Ukrajinu. Kromě těchto faktorů byla zohledněna také možná rizika spojená s budoucími změnami v letových prostorech a struktuře letecké sítě. Dále byly zahrnuty potenciální vlivy dalších válečných konfliktů, teroristických útoků, přírodních katastrof a mezinárodních sankcí a zákazů [14].

V případě střednědobých předpovědí existuje relativní shoda mezi prognózami představenými EUROCONTROLem, FAA a společností Airbus. Všechny tyto zprávy naznačují, že návrat k úrovni letového provozu, která byla běžná před pandemickou krizí, by mohl být dosažen do roku 2023.



Obr. 9 Předpovědi se scénáři [15]



Střednědobé předpovědi zahrnují předpoklad, že návrat k úrovni letecké dopravy, která byla běžná před pandemickou krizí v roce 2019, by mohl být dosažen do roku 2023 a v nejhorším scénáři až v roce 2027. Následně se očekává stabilní růst letecké dopravy, ačkoliv mezi jednotlivými předpověďmi mohou existovat drobné rozdíly v kvantitativních hodnotách. Všechny zprávy však konvergují k názoru, že po návratu na úroveň z roku 2019 bude následovat stabilní růst letecké dopravy.

V rámci předpovědi od EUROCONTROL byly vytvořeny tři různé scénáře, přičemž každý z nich je závislý na specifických proměnných. Těmito faktory jsou nadále epidemiologické ukazatele a konečné zvládnutí pandemické krize. Důležitými parametry jsou i ekonometrické ukazatele, jako je výše hrubého domácího produktu a jeho růst. Zohledněny jsou i dlouhodobé legislativní kroky, včetně regulace, úrovně podpory letecké dopravy a průmyslu. Všechny tyto scénáře konvergují k podobnému závěru, tj. ke stabilnímu růstu letecké dopravy, přičemž rozdíly se projevují především v počátečním období po skončení pandemické krize [15] [16] [17].

## **2.2 Problematika sledování letového provozu**

Sledování letového provozu je klíčovou součástí řízení letového provozu. Neustálé poskytování přesných polohových a mnoha dalších údajů o provozu je nezbytné pro bezpečné a efektivní řízení letového provozu a koordinaci. Z dlouhodobého hlediska se počet letadel využívající vzdušný prostor stále roste i přes nedávné poklesy z důvodu mimořádných událostí [18] [19].

Mezi hlavní funkce řízení letového provozu patří regulace letového provozu, udržování plynulého provozu, zabraňování kolizím mezi letadly a kolizím mezi letadly a pozemními překážkami. Poskytování těchto kritických služeb je zodpovědností řídicích letového provozu, kteří se opírají o široké spektrum technických systémů a infrastruktur, jež jim umožňují provádět řízení letového provozu od odletu až po přistání, a to s maximálním důrazem na bezpečnost, efektivitu a spolehlivost operací [20].

### **2.2.1 Datové zdroje pro sledování letadel**

#### **Primární radary**

Primární přehledový radar je nejstarší a také jedno z nejrozšířenějších používaných zařízení pro sledování letového provozu. Historie tohoto zařízení sahá do 30. let minulého století, avšak další vývoj pokračuje dodnes.



Obr. 10 Primární radar [21]

Primární radar jako zařízení pracuje na principu vysílání a přijímání elektromagnetického signálu. Součástí zařízení je anténa, která ve většině případech bývá parabolického tvaru. Uvnitř zařízení je generován elektrický signál, který je následně přeměněn na elektromagnetický signál a je vyslán skrze anténu primárního radaru. Anténa primárního radaru slouží jak pro vysílání tak i přijímání elektromagnetického signálu. Z tohoto důvodu je součástí zařízení duplexor, který je schopen přepínat cestu mezi vysílačem a přijímačem. Pro efektivní fungování je zapotřebí většího množství energie, jelikož vysílač musí vygenerovat dostatečně silný signál, který bude schopný zachytit po uražení cesty k letadlu a od letadla zpět [22].

Princip funkce primárního radaru je založený na vyslání elektromagnetického pulzu do specifického směru, dle směru orientace antény. Primární radar následně přijímá odražený elektromagnetický pulz, který se odrazil od letadla. Na základě informace doby trvání od vyslání pulzu do jeho přijetí, je možné vypočítat vzdálenost, kterou elektromagnetický signál urazil. Na základě této logiky je primární radar určit přímou vzdálenost letadel. Pomocí informace ohledně směru natočení antény je možné získat azimut daného letadla. Výhodou této metody je, že je zcela pasivní a na palubě není zapotřebí žádného aktivního systému [20] [22].

Nevýhodou tohoto systému je, že není schopný zachytit objekty letící nad zařízením. Jedná se o oblast ve tvaru kuželu od zařízení směrem nahoru. Jako další nevýhoda je identifikace. Jelikož se jedná o pasivní systém, je dostupná informace o tom, že se na v nějaké pozici nachází letadlo, ale není možné pomocí primárního radaru letadlo identifikovat [20] [22].

## Sekundární radar

Sekundární přehledový radar je druh radarového systému používaný pro získání dat o letadlech, která jsou dále požívána pro funkci řízení letového provozu. Tento systém poskytuje přesnější informace o poloze, identitě a výšce letadel, což zlepšuje bezpečnost a efektivitu letového provozu [23].

Sekundární radar pracuje na principu dotazu a odpovědi. Signál vysílaný ze sekundárního radaru nese specifický dotaz, který je přijímán a dekodován odpovídačem instalovaným v letadle. Na základě tohoto dotazu ze sekundárního přehledového radaru (SSR) odpovídač generuje odpověď a zakóduje ji do signálu, který je pak vysílán z letadla. Signál je následně zachycený sekundárním radarem a je dekodován. Z dekodovaného signálu jsou následně získány informace, na které bylo letadlo dotazováno. Určení směru přijmutí signálu je určeno stejným způsobem jako u primárního radaru. Možnost vysílání signálu, který v sobě nese informace nebo data vylepšuje nevýhody, které se nacházely u primárního radaru [23].

Jelikož je u sekundárního radaru zapotřebí, aby signál urazil pouze cestu k letadlu, není zapotřebí jako u primárního radaru vysokých výkonů. Z tohoto důvodu již také není zapotřebí parabolická anténa. Je však stále zapotřebí otáčení antény sekundárního radaru a nevýhoda z primárního radaru ohledně zachycení letadel přímo nad sekundárním letadlem, stále přetrvává.

V rámci sekundárního radaru je možné pracovat s větším množstvím informací. Sekundární radar pracuje v několika módech, kde každý mód vyžaduje odlišnou informaci od letadla. V civilním letectví se jedná o mód A, C a S. Mód A poskytuje možnost vložení do signálu čtyřmístnou identifikaci v osmičkové číselné soustavě. Mód C je velmi podobný módu A, avšak místo identifikace letadla je v signálu informace o jeho výšce, také v osmičkové číselné soustavě. Signály obou módů jsou složeny z několika pulsů a mód A a C se od sebe odlišují časovou prodlevou mezi jednotlivými pulsy [23].

Mód S je v rámci signálu schopný vysílat 24-bitovou adresu, která je unikátní pro každý odpovídač módu S. Se zvýšenou schopností režimu módu S je možné dotazovat se a odesílat odpovědi v několika možných formátech jako uplinkových formátech pro dotazy a downlinkových formátech pro odpovědi. Požadované informace a samotné informace jsou v dotazech a odpovědích v data blocích, které se mohou skládat z 56 nebo 112 bitů [24] [25] [26].



Obr. 11 Sekundární radar [27]

### Multilaterační systém

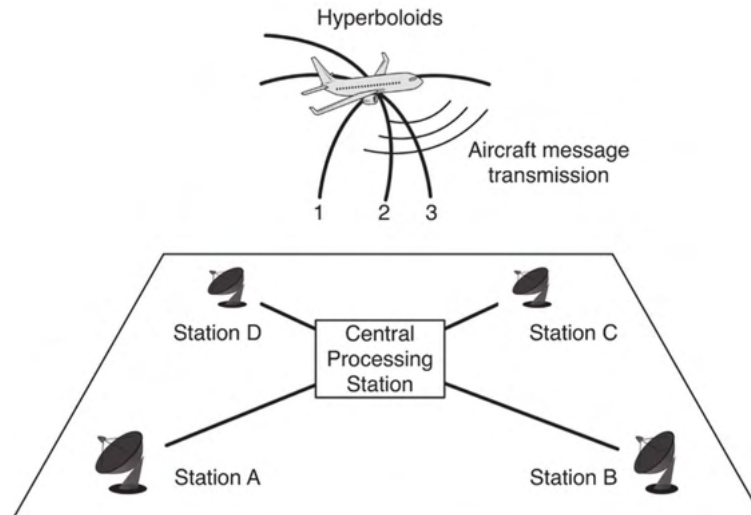
Multilaterace by se dala nazvat alternativou k získání přehledových dat o leteckém provozu. Systémy fungující na principu multilaterace jsou jedny z nejrychleji rozšiřujících se systémů obzvláště v oblasti poskytovatelů letových provozních služeb. Původně se jednalo o systém zamýšlený pro vojenské účely, ale velké využití našel v civilní letecké dopravě.

Multilaterační systém byl původně vyvinut pro sledování vesmírných objektů. Během sedmdesátých let prošel systém modifikací a začal být používán jako přehledový systém v letecké dopravě. Tento systém funguje na principu rozdílu času přijetí signálu. Jedná se o princip, kdy signál od specifického cíle je přijat na více přijímacích antén tohoto systému. Každou anténou je signál zachycený v jiný čas a na základě rozdílu času přijetí je možné lokalizovat pozici ze které byl signál vyslán. Lokalizace cíle probíhá vytvořením tří hyperboloid, které se protnou v místě odkud signál vyšel [20] [28] [29].

Multilaterační systém jsou schopné pracovat jako pasivní systém, u kterého není nutné vysílat signály letadlům. Systém je schopný pracovat na základě odpovědí sekundárního radaru a zpráv systému automatický závislý přehled - vysílání (ADS-B). Na základě těchto informací je schopný určit polohu letadla.

Je však možná i aktivní konfigurace, která využívá jednoho nebo více dotazovačů. Tyto dotazovače se aktivně dotazují letadel a na základě toho mají určitou kontrolu nad samotnými odpověďmi. Aktivní multilaterační systém má také velký efekt na přesnost, jelikož umožňuje aplikovat při lokalizaci eliptickou metodu.

Tato metoda funguje na principu vytváření elipsy okolo vysílače dotazu a přijímače odpovědi. Vytvořená elipsa pak tvoří prostor okolo vysílače a přijímače, kde by se letadlo mohlo nacházet a pomocí hyperboloidů je možné provést konečnou lokalizaci a získat přesnější pozici než v pasivním režimu [20].



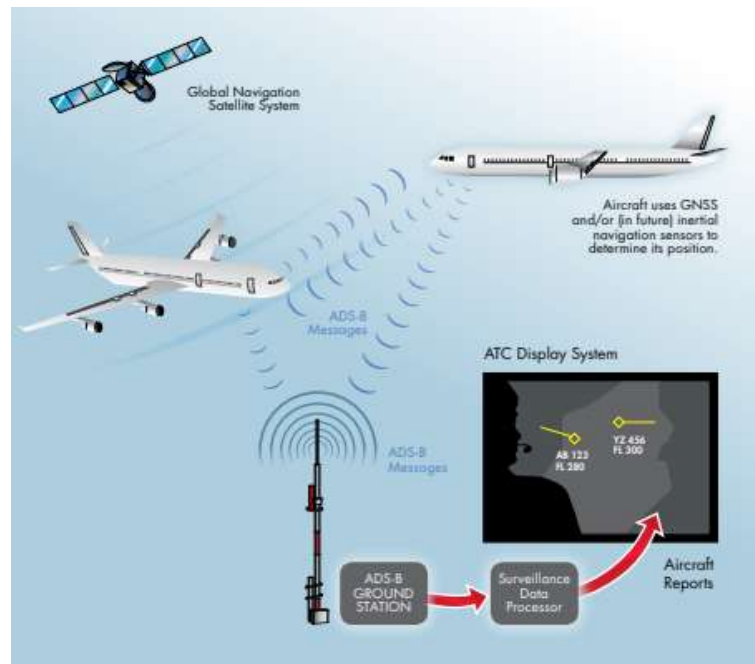
Obr. 12 Schéma multilateračního systému [30]

## ADS-B

ADS-B je kooperativní systém sledování. Poloha, která byla určena na palubě letadla za pomoci přijímače globálního družicového polohového systému (GNSS), je s dalšími údaji, jako identifikace letadla nebo rychlost letadla, pravidelně vysílána za pomoci rozšířeného dotazovače módu S [31].

ADS-B zpráva je složena ze 112 bitů, kde v prvních 5 bitech je určen formát zprávy a další 3 bity nesou informaci o schopnostech odpovídače. Následujících 24 bitů obsahuje ICAO adresu letadla a v dalších 5 bitech se nachází informace ohledně typu zprávy. Typů zpráv je několik a každý typ pracuje a obsahuje jiný typ informací. Jedná se o informace jako identifikace letadla, poloha letadla na povrchu, stav letadla nebo jeho poloha. Poté následuje 56 bitový datový blok, ve kterém se nacházejí informace dle typu zprávy. Na konci je ve 24 bitech informace o paritě dat, která slouží k ověření integrity přijatých dat [20].

Mezi hlavní výhody tohoto systému je jeho pořizovací cena oproti ostatním přehledovým systémům. Další výhodou je možnost poskytovat informace jak o letadlech ve vzduchu, tak i o letadlech na zemi. Systém má také vysokou obnovovací frekvenci, která je stanovena na 1 sekundě [20] [31].



Obr. 13 Schéma ADS-B [20]

### 2.3 Clusterování

Clusterování představuje klíčový prvek v oblasti analýzy dat, kde techniky tohoto typu slouží k rozdělení objektů do skupin nazývaných clustery. Cílem je zajistit, aby objekty v rámci jednoho clusteru vykazovaly podobnost mezi sebou a současně se lišily od objektů ve zbývajících clusterech. Míra podobnosti je obvykle definována na základě vzájemné blízkosti objektů v prostoru, a to na základě vzdálenostní funkce [32].

Skupování objektů představuje fundamentální úkol s širokým spektrem aplikací v oblastech jako je astronomie, umělá inteligence, biologie, chemie, správa vztahů se zákazníky, historie, získávání informací, zpracování obrazu, rozpoznávání vzorů, psychologie a doporučovací systémy. Clusterování našlo úspěšné uplatnění v oblastech jako geografie, marketing a medicína, přestože terminologie a postupy zpracování dat mohou variabilně kolísat, základní algoritmy samy o sobě nabízejí široké spektrum aplikací [33].

Z akademického hlediska lze cluster pojímat jako podmnožinu objektů sdílejících podobné vlastnosti. Jedná se o proces „učení bez učitele“, kde jsou podobné datové vzorky spojovány, přestože kritéria klasifikace mohou být různá. Přesnější definice clusteru může znít jako soubor datových objektů s mnoha možnostmi klasifikace.

Clusterování lze využít také pro detekci odlehlých hodnot. Analytický přístup ke clusterování může sloužit jako nástroj pro hlubší pochopení distribuce dat [33].

### 2.3.1 Clusterovací metody

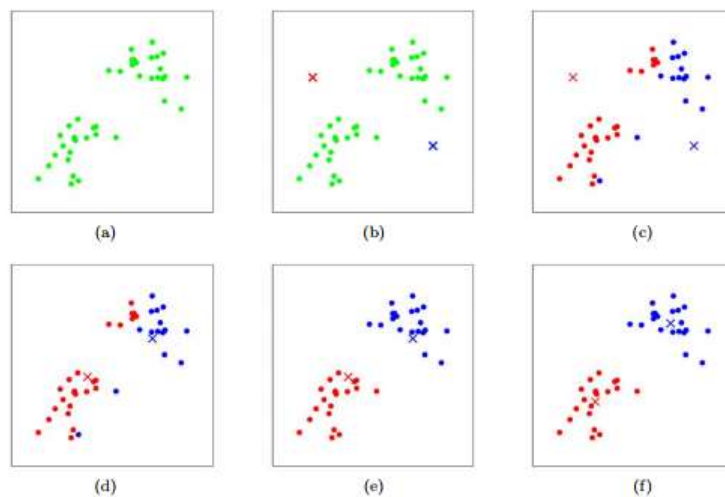
Clusterovací metody představují heterogenní soubor možností, které se dají kategorizovat do několika hlavních skupin, mezi něž patří metody založené na centroidech, hierarchické metody, metody založené na hustotě, metody založené na mřížce a modely založené na rozdělení. Každá z těchto metod disponuje svou specifickou povahou a zaměřuje se na individuální řešení různých aspektů spojených s clusterováním [33].

Vzhledem k omezenému rozsahu a zaměření diplomové práce budou v rámci této kapitoly podrobněji probírány pouze vybrané metody a algoritmy.

#### Clusterovací metoda založené na centroidech

Metoda založená na centroidech organizuje data do nehirarchických clusterů, přičemž nejčastěji využívaným algoritmem je K-means. Tato efektivní metoda rozděluje datové sady do předem definovaného počtu clusterů na základě blízkosti k centrálním hodnotám, známým jako centroidy. Centroid je průměrná nebo střední hodnota všech bodů v clusteru a slouží jako reprezentativní centrální bod clusteru. Centroidní clusterování, zejména K-Means, je široce využíváno pro analýzu a optimalizaci rozsáhlých datových sad. Tyto metody iterativně měří vzdálenost mezi clustery a centroidy pomocí různých metrik, například euklidovské nebo manhattan vzdálenosti [33] [34].

Centroidní clusterování odděluje data na základě více centroidů, přičemž každý bod je přiřazen do clusteru na základě druhé mocniny vzdálenosti od nejbližšího centroidu. Poté co je vypočítána vzdálenost mezi bodem a všemi centroidy, dochází k přiřazení bodu do clusteru s nejbližším centroidem. Přiřazení bodu se však může měnit, jelikož samotná pozice centroidu v rámci svého clusteru se může měnit v průběhu iterací. Tato metoda se zaměřuje na konstrukci k-partitionů dat, přičemž cílem je přiřadit každý objekt do právě jedné skupiny. Slabým místem je situace, kdy je vzdálenost mezi dvěma body z centra příliš blízká jinému clusteru, což může vést k nízkým nebo zavádějícím výsledkům v důsledku překrývání datových bodů [33] [35].



Obr. 14 Ukázka K-means clusterovacích iterací [36]

Tato metoda clusterování zahrnuje několik algoritmů, včetně známých přístupů jako K-Means, K-Medoid a CLARANS, které se snaží dosáhnout optimálního rozdělení dat do clusterů na základě stanovených kritérií [33].

### Clusterovací metoda založená na hustotě

Clusterovací metoda založená na hustotě je založena na základním konceptu identifikace hustoty v konkrétním segmentu datového prostoru. Cílem této metody je nalézt clustery na různých úrovních granularity s odpovídajícím filtrem pro efektivní odstranění šumu. Princip hustotního konceptu v hustotně založené metodě umožňuje účinné oddělení kompaktních oblastí v datovém prostoru od okolního šumu. V rámci této clusterovací metody jsou clustery identifikovány jako oblasti s výrazně vyšší hustotou než zbytek datového prostoru [37].

Algoritmy založené na hustotě se zaměřují na identifikaci clusterů v datovém prostoru na základě výrazně vyšší hustoty ve srovnání s okolím, proto tato metodologie umožňuje efektivní detekci clusterů s variabilními tvary (38). Mezi příklady algoritmů využívajících tuto metodu patří DBSCAN, DENCLUE a OPTICS [33].

Prostorové clusterování na základě hierarchické hustoty se šumem (HDBSCAN) je moderní metoda clusterování založená na hustotě dat. Tento algoritmus provádí clusterování dat při různých hodnotách parametru epsilon a integruje výsledky tak, aby identifikoval clusterování s nejlepší stabilitou při různých úrovních hustoty. HDBSCAN vytváří hierarchickou strukturu clusterů, což znamená, že dokáže zachytit složité struktury v datech a usnadnit analýzu clusterování na různých úrovních detailu. Algoritmus je schopen adaptivně



přizpůsobit hodnotu epsilon v průběhu procesu clusterování, což umožňuje detekci clusterů s variabilními tvary a velikostmi [38].

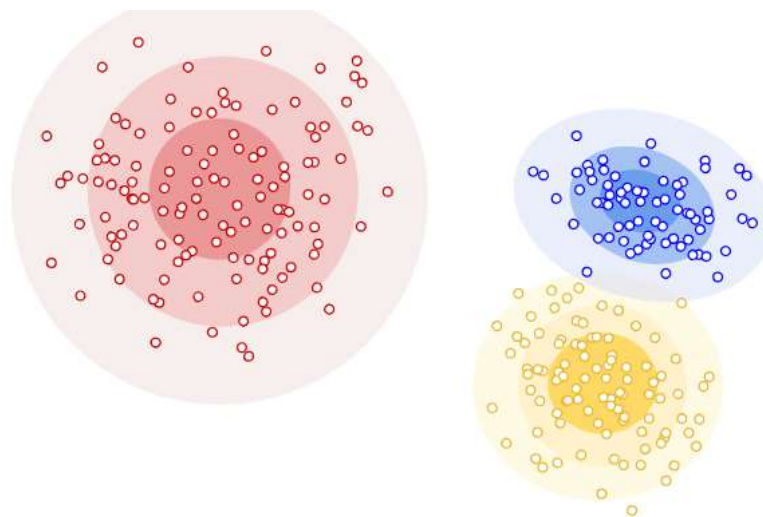


Obr. 15 Ukázka rozdílu mezi K-means a HDBSCAN clusterů [39]

## Metody clusterování založené na rozdělení

Clusterování založené na rozdělení propojuje oblasti s vysokou hustotou vzorků do clusterů. Tato metodologie umožňuje tvarování clusterů s libovolnými tvary, pokud lze propojit oblasti s vysokou hustotou. Dosud známé metody clusterování jsou buď založeny na blízkosti nebo na hustotě. Existuje skupina algoritmů pro clusterovací analýzu, která se odlišuje od ostatních tím, že při svém hodnocení zohledňuje pravděpodobnost pomocí specifických metrik. Jedná se o pravděpodobnostně založenou rozdělení, která využívá statistických distribucí ke clusterování datových objektů. Cluster zahrnuje data s vyšší pravděpodobností, že do daného clusteru patří. Každý cluster má svůj středový bod, čím je vzdálenost datového bodu od středového bodu větší, tím menší bude pravděpodobnost, že bude začleněn do daného clusteru [34] [40] [41].

Gaussovský model směsi (GMM) je metoda clusterování, která pracuje na základě statistické distribuce dat. Předpokládá, že data pocházejí z Gaussovských distribucí. Jedná se o pravděpodobnostní metodu, kde pravděpodobnost, že bod patří do clusteru, klesá s nárůstem vzdálenosti od distribuce. GMM trénuje datovou sadu a pro každý objekt předpokládá existenci clusteru [35] [34].



Obr. 16 Ukázka clusterování na základě rozdělení [40]

## 3 Metodika

Metodika nabízí podrobný přehled procesu vytváření softwarového řešení. Kapitola se strukturuje do dvou klíčových částí, kde první odpovídá popisu tvorby softwaru a druhá část obsahuje validaci vytvořeného řešení.

### 3.1 Tvorba Softwaru

Tato část práce se zabývá vývojem softwaru pro vizualizaci současné a předpovídané distribuce letecké dopravy. Pro vývoj tohoto softwaru bylo zvoleno vývojové prostředí PyCharm a programovací jazyk Python. Data, na kterých software pracuje, byla získána z OpenSky Network [42], což je zdroj informací o leteckém provozu. Zdrojový kód vytvořeného softwaru je možné najít na tomto odkazu: <https://github.com/matokavka/DP.git>.

Cílem tohoto softwaru je poskytnout funkce pro zpracování a analýzu historických dat letového provozu a vytváření predikce budoucí distribuce letového provozu. Softwarové řešení má plnit několik klíčových funkcí:

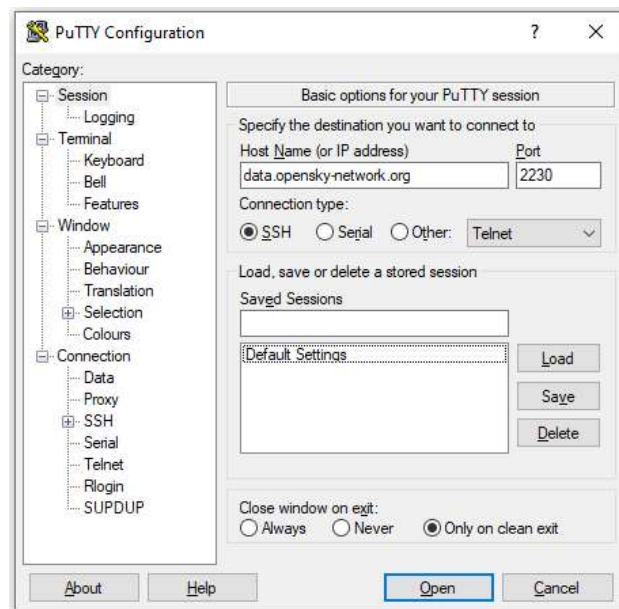
- **Zpracování a filtrování dat:** Software je schopen zpracovávat rozsáhlé množství dat o letovém provozu a umožňuje uživateli provádět filtraci dat podle různých kritérií, jako je výběr státu a letového provozu daného státu.
- **Vytváření clusterů:** Software umožňuje vytváření clusterů ze souboru dat letového provozu. Tato funkcionality umožňuje identifikaci skupiny letadel, které mají podobné charakteristiky.
- **Generování a mazání letadel:** Software poskytuje možnost generovat nebo mazat předem definovaný počet letadel z datového souboru. Tato funkcionality umožňuje simulovat různé scénáře letového provozu.
- **3D vizualizace letového provozu:** Software umožňuje vytváření 3D vizualizací letového provozu nad specifickým prostorem.

Pro zajištění efektivity a přehlednosti byl celý vývoj softwarového řešení rozdělen do dílčích úkolů, z nichž každý reprezentuje jednu z funkcí softwaru. Kromě hlavních funkcí byly vytvořeny také asistenční funkce, které umožňují vizualizaci specifických dat a proměnných a slouží k potvrzení správnosti zvolených konceptů a postupů. Tyto asistenční funkce hrají důležitou roli při kontrole a ověřování správnosti implementace jednotlivých částí programu, což je zásadní pro kvalitu vytvořeného softwarového produktu.

### 3.1.1 Získávání, načítání a filtrování dat

Pro zahájení vývoje softwarového systému s hlavním cílem vizualizace historických dat letového provozu a budoucí distribuce letového provozu bylo klíčové získat přesné a relevantní vstupní informace. Tato část se věnuje popisu procesu získávání dat a jejich přípravy pro následné zpracování.

Prvním krokem bylo získání historických dat letového provozu z OpenSky Network [42]. Pro tento účel byl využit software Putty [43], který slouží k přístupu do databáze letového provozu. Tento software je v oblasti vzdáleného přístupu dobře zdokumentován a je běžně využíván v oblasti počítačových věd a informatiky. Po jeho spuštění bylo nutné zadat cílovou síť, což v tomto konkrétním případě znamenalo OpenSky Network [42], a příslušné číslo spojení.



Obr. 17 Software Putty

Následně byly vyžadovány vstupní přihlašovací údaje pro přístup k databázi, a to pomocí přihlašovacího jména a hesla. Tyto přihlašovací údaje byly poskytnuty Ústavem letecké dopravy. Po úspěšném ověření přihlašovacích údajů bylo možné vybrat specifická data ke stažení. Ústav letecké dopravy poskytl instruktážní dokument, který obsahoval příklady příkazů, které bylo nutné zadat do příkazového řádku software Putty [43] pro stažení specifických dat.

Byla zvolena sada dat obsahující informace o pozici letadel, což bylo klíčové pro navrhovaný software. Příkaz také obsahoval časový rozsah dat a počet požadovaných záznamů. Tato data byla nezbytná pro následnou analýzu a vizualizaci letového provozu.

```

data.opensky-network.org - PuTTY
login as: ATM_Lab
ATM_Lab@data.opensky-network.org's password:
Starting Impala Shell without Kerberos authentication
*****
OpenSky Network Impala Shell
*****
[hadoop-29:21000] > SELECT * FROM state_vectors_data4 WHERE HOUR=1604059200 ORDE
R by rand() limit 10;

```

Obr. 18 Příkazový řádek softwaru Putty

Proces stahování dat fungoval správně a po vykonání příkazu software Putty [43] zobrazil požadované hodnoty. Dále byl výstupní soubor, který obsahoval získaná data o letovém provozu, uloženo ve vybraném adresáři. Výstupní soubor byl ve formátu textového dokumentu a každý řádek tohoto dokumentu obsahoval informace o jednom konkrétním letadle.

Struktura každého řádku obsahovala následující údaje: identifikaci letadla, časovou známku dané informace, pozici v zeměpisných souřadnicích (ve stupních zeměpisné šířky a výšky), kurz letadla, informaci o tom, zda je letadlo na zemi nebo ve vzduchu, a také jeho aktuální výšku. Tyto informace byly odděleny na jednotlivých řádcích pomocí vertikálních čar, což zajišťovalo jednoduchý a čitelný formát datového souboru.

Kromě toho byla data přenesena do excelu, což zjednodušilo jejich následnou analýzu a filtrování. Tento postup byl zvolen z důvodu usnadnění manipulace s daty a minimalizace možných chyb při jejich zpracování.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	time	icao24	lat	lon	velocity	heading	vertrate	callsign
2								
3	1,6E+09	4846fc	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	REFT3TOF
4	1,6E+09	75833b	20.37386615	71.0645141	235.23764	288.35574	0	PAL568Z
5	1,6E+09	4bb182	46.79416975	28.3836593	260.79824	345.14134	-0.32512	THY79K
6	1,6E+09	3e6050	46.77350064	8.42287445	NULL	NULL	NULL	DKBRC
7	1,6E+09	3c3d0d	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	THALES
8	1,6E+09	ab7cd8	28.61715025	-82.408824	60.776284	15.212584	-0.32512	N8395H
9	1,6E+09	78011a	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	TEST1234
10	1,6E+09	a3d166	45.40849584	-93.8323524	82.043734	253.61044	0	N345RP
11	1,6E+09	4b1a34	40.72178644	17.8391723	139.00464	126.57304	-2.60096	EZS3ZHU
12	1,6E+09	3dd794	48.68174744	9.19478196	0	0	0	PBW11

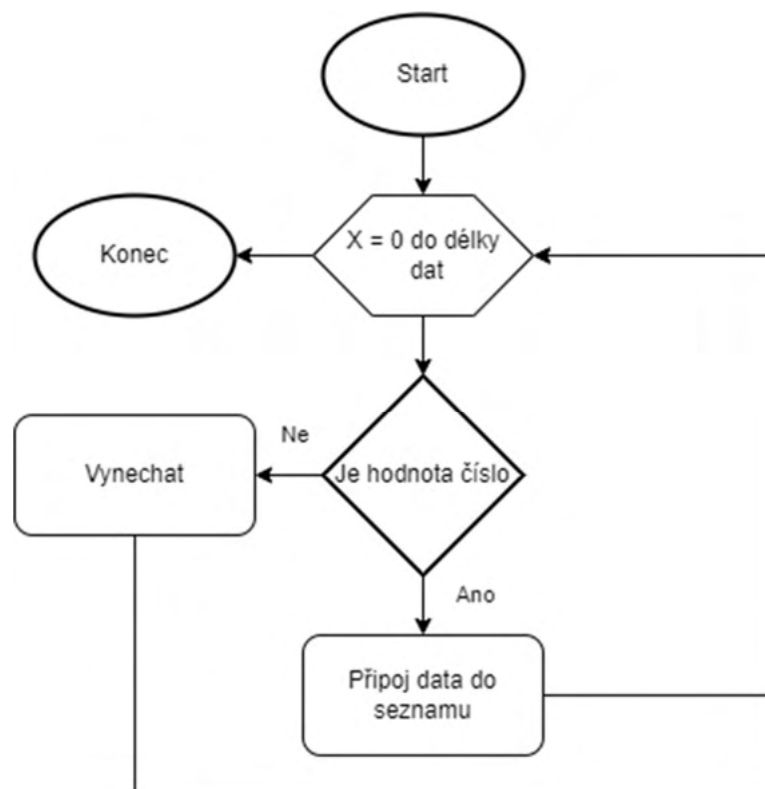
Obr. 19 Výstup dat z programu Putty a přenesení do excelu

Následující kroky vývoje zahrnovaly tvorbu programu, který by byl schopen načíst excelový soubor z vývojového prostředí a uložit ho do vhodné proměnné.

Vzhledem k tomu, že soubor obsahoval seznam souřadnic, byla vybrána proměnná typu seznam pro uchování dat.

Při tvorbě dané části programu bylo použito speciální knihovny, protože na trhu existují knihovny, které nabízejí funkce pro načítání dat z excelových souborů. Jako nejpoužívanější knihovna pro manipulaci se soubory excel je Pandas [44]. Software byl schopen identifikovat cílový excelový soubor a vybrat specifické sloupce podle jejich názvu. Tyto sloupce byly následně ukládány do již připravených seznamových proměnných.

Dalším krokem byla filtrace dat, protože v datech se vyskytovaly chybové nebo chybějící hodnoty, které byly automaticky nahrazeny hodnotou "NULL". Zejména sloupce obsahující zeměpisnou šířku a výšku byly důkladně zkontrolovány, a pokud se v nich nacházela hodnota "NULL", byl příslušný řádek dat vynechán. K tomu sloužila ověřovací funkce `isNaN` [45], která byla schopna rozpoznat, zda je určitá hodnota číslem, a vytvořit výstup "False" nebo "True". Pokud byly hodnoty v příslušných sloupcích čísla, byly souřadnice uloženy do příslušných proměnných. Pokud hodnota nebyla číslem, daná iterace byla vynechána, data nebyla uložena a program pokračoval k další iteraci.



Obr. 20 Vývojový diagram filtrace nečíselných hodnot

Po úspěšném získání, načtení a filtraci dat byl software připraven pro další kroky ve zpracování datové sady letového provozu. Veškerá chybová či chybějící data byla vyfiltrována z excelového souboru. Výsledkem bylo, že veškerá korektní data byla uložena do specifických proměnných, které byly následně využity pro další analýzy a vizualizace.

### 3.1.2 2D vizualizace a prostorové ověření dat

Dalším důležitým úkolem bylo vytvoření 2D vizualizace prostorových dat, což představovalo klíčový krok v ověření funkčnosti konceptu vizualizace dat. Cílem bylo vytvořit software, schopný vytvářet polygony o určitých rozměrech a vizualizovat je. Existuje řada knihoven pro vizualizaci v programovacím jazyce Python, přičemž tato oblast je dobře zdokumentována a zahrnuje různé nástroje a funkce pro tuto činnost. Pro provádění vizualizace byla vybrána knihovna Matplotlib [46], specializovaná na 2D a 3D vizualizaci prostorových dat. Tato knihovna nabízí širokou škálu modulů a funkcí pro vytváření vizualizací.

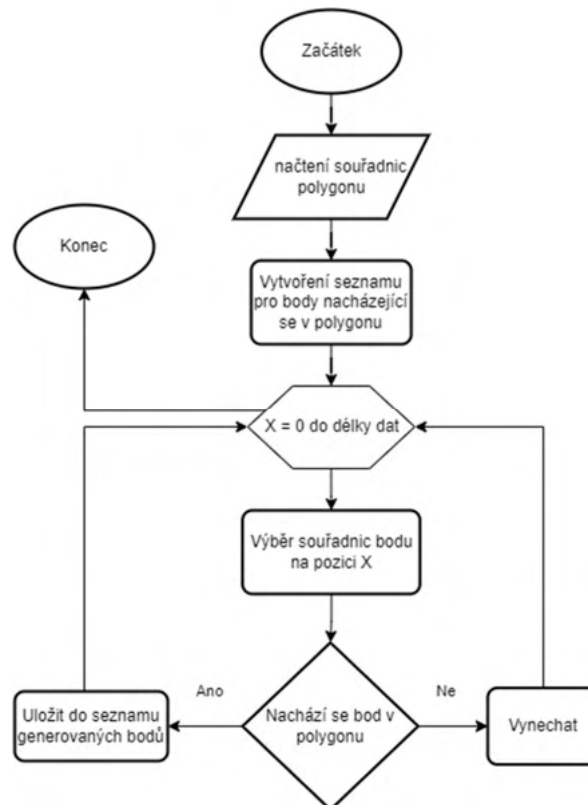
V případě vytváření polygonů byl využit modul Polygon, který obsahuje potřebné funkce pro definici polygonu na základě specifikovaných bodů. Program byl navržen tak, aby byl schopen generovat polygony a ověřovat, zda se jednotlivé body z datové sady nacházejí uvnitř těchto polygonů. Tato fáze byla důležitým testem funkčnosti vizualizačního konceptu a přispěla k ověření, zda software zpracovává data správně a generuje očekávané vizualizační výstupy.

Pro ověření funkčnosti softwaru byl vytvořen testovací scénář, který zahrnoval tvorbu testovacích sad bodů a polygonů. Pro získání těchto dat bylo využito Google maps [47], které jsou schopné poskytnout souřadnice pro vybrané body na mapě. Územím pro testování byla zvolena Česká republika, která byla reprezentována 6 body z jejich hranic. Tato volba umožnila rychlý vývoj a testování softwaru s omezeným množstvím bodů, které co nejvíce odpovídaly reálnému území České republiky.

Získané souřadnice sloužily jako vstup pro tvorbu polygonu a následně ověření, zda se další body nacházejí uvnitř tohoto polygonu. Prvním krokem bylo vytvoření seznamu souřadnic, který byl použit pro vytvoření polygonu reprezentující území České republiky. Tento seznam obsahoval souřadnice, které definují vrcholy polygonu.

Dále byl vytvořen druhý seznam souřadnic, který reprezentoval body uvnitř tohoto polygonu. Tato část testovacího scénáře byla důležitá pro kontrolu správné funkčnosti algoritmu pro určení, zda se body nacházejí v daném polygonu.

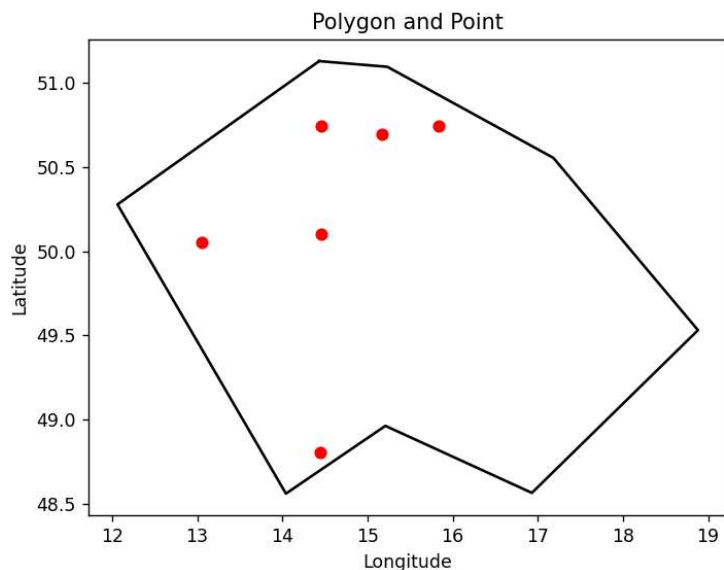
V samotném softwaru byl vytvořen algoritmus pro vytvoření polygonu na základě zadaných souřadnic. Poté byla navržena funkce pro ověření, zda se body nacházejí uvnitř polygonu. Algoritmus procházel seznam bodů a pomocí speciální funkce kontroloval, zda jsou tyto body uvnitř polygonu. Body, které byly uvnitř polygonu, byly uloženy do seznamu bodů nacházející se v polygonu, zatímco ty mimo polygon byly vynechány. Výstupem této fáze byl seznam bodů, které se nacházely uvnitř polygonu. Algoritmus byl popsán vývojovým diagramem pro lepší přehlednost.



Obr. 21 Vývojový diagram kontroly bodů v polygonu

Jako následující krok bylo nezbytné upravit vizualizaci tak, aby zahrnovala 2D zobrazení polygonu a všechny body, které se uvnitř tohoto polygonu nacházely. V této části tvorby programu byl použit seznam, který obsahoval všechny body uvnitř polygonu. Výsledkem této části tvorby je 2D vizualizace polygonu spolu se všemi body, které se v daném prostoru nacházely.





Obr. 22 První 2D vizualizace polygonu a bodů

### 3.1.3 Zpracování vzdušných prostorů

Po dokončení dílčích částí softwaru, které se specializovaly na základní operace týkající se polygonů a bodů, se přešlo k problematice vzdušných prostorů. Plánovaný finální program měl operovat v rámci Evropy a zahrnovat zpracování vzdušných prostorů na evropském kontinentu. Tato úloha představovala výzvu, neboť geografické souřadnice hranic národních vzdušných prostorů byly publikovány v různých národních leteckých informačních publikacích a každá země je prezentovala v odlišném formátu. Naštěstí organizace EUROCONTROL již měla tyto souřadnice zpracovány a dostupné v jednotném formátu.

Obvykle by bylo nutné tato data vyžádat a čekat na schválení. Nicméně z důvodu omezeného časového rámce a kvůli přístupu vedoucí diplomové práce k systémům EUROCONTROL byl tento proces urychlen. Avšak data poskytnutá z EUROCONTROL vyžadovala důkladné úpravy a další zpracování, než mohla být využita v programu [48].

Data byla poskytnuta v excelovém souboru, kde v prvním sloupci byla identifikační značka prostoru a v dalších dvou sloupcích byly zeměpisné souřadnice daných hranic ve tvaru zeměpisné šířky a délky.

12517	LIMMUJR	46.55639	13.31611
12518	LIMMUJR	46.55833	13.23639
12519	LIMMUJR	46.58889	13.16861
12520	LIMMUJR	46.6075	12.91528
12521	LIMMUJR	46.67583	12.47722
12522	LIMMUJR	46.8025	12.28111
12523	LIMMUJR	46.825	12.30778
12524	LIMMUJR	46.87083	12.28639
12525	LIMMUJR	46.87722	12.21667
12526	LIMMUJR	46.90639	12.15833
12527	LIMMUJR	47	12.12778
12528	LIMMUJR	47.025	12.19167
12529	LIMMUJR	47.06667	12.23333
12530	LIMMUJR	47.08694	12.18889
12531	LIRRFIR	43.51667	13.33333
12532	LIRRFIR	43.53889	13.04167
12533	LIRRFIR	43.65333	11.92528
12534	LIRRFIR	43.67694	11.63667
12535	LIRRFIR	43.68361	XI.56
12536	LIRRFIR	43.69444	11.51111
12537	LIRRFIR	43.71667	11.16667
12538	LIRRFIR	43.66417	10.79889
12539	LIRRFIR	43.65917	10.77056
12540	LIRRFIR	43.64639	10.71111
12541	LIRRFIR	43.63972	10.67444

Obr. 23 Ukázka více druhů prostorů

Informace o hranicích vzdušného prostoru jsou reprezentovány pomocí bodů, které určují zlomy nebo změny směru hranic. Každý zlom na hranici je identifikován souřadnicemi. Na základě této logiky bylo možné usoudit, že země, jejichž vzdušné prostory jsou tvořeny několika jednoduchými úseky, vyžadují pouze několik bodů. Oproti tomu státy, jejichž vzdušné hranice kopírují pozemní státní hranice, mohou sestávat ze stovek takových bodů. Důležité je zdůraznit, že excelový soubor obsahoval body definující hranice letové informační oblasti (FIR), nikoli státních vzdušných prostorů.

Každý stát byl reprezentován v excelovém souboru podle jedinečného identifikátoru, obsahující všechny FIRy, které se v daném území vyskytovaly. Vezměme si například Německo, které má vzdušný prostor složený z tří FIRů: EDWW, EDGG a EDMM. Tyto FIRy byly uvedeny v excelovém souboru s příslušnými body definujícími jejich hranice.

Vzhledem k nově získaným informacím bylo nezbytné provést revizi dalšího postupu. Celkovým cílem finálního softwarového řešení bylo manipulovat s celými národními vzdušnými prostory, protože předpovědi letového provozu jsou vytvářeny na úrovni států nebo regionů, nikoliv na úrovni jednotlivých FIRů.



Obr. 24 Ukázka rozdělení vzdušného prostoru Německa

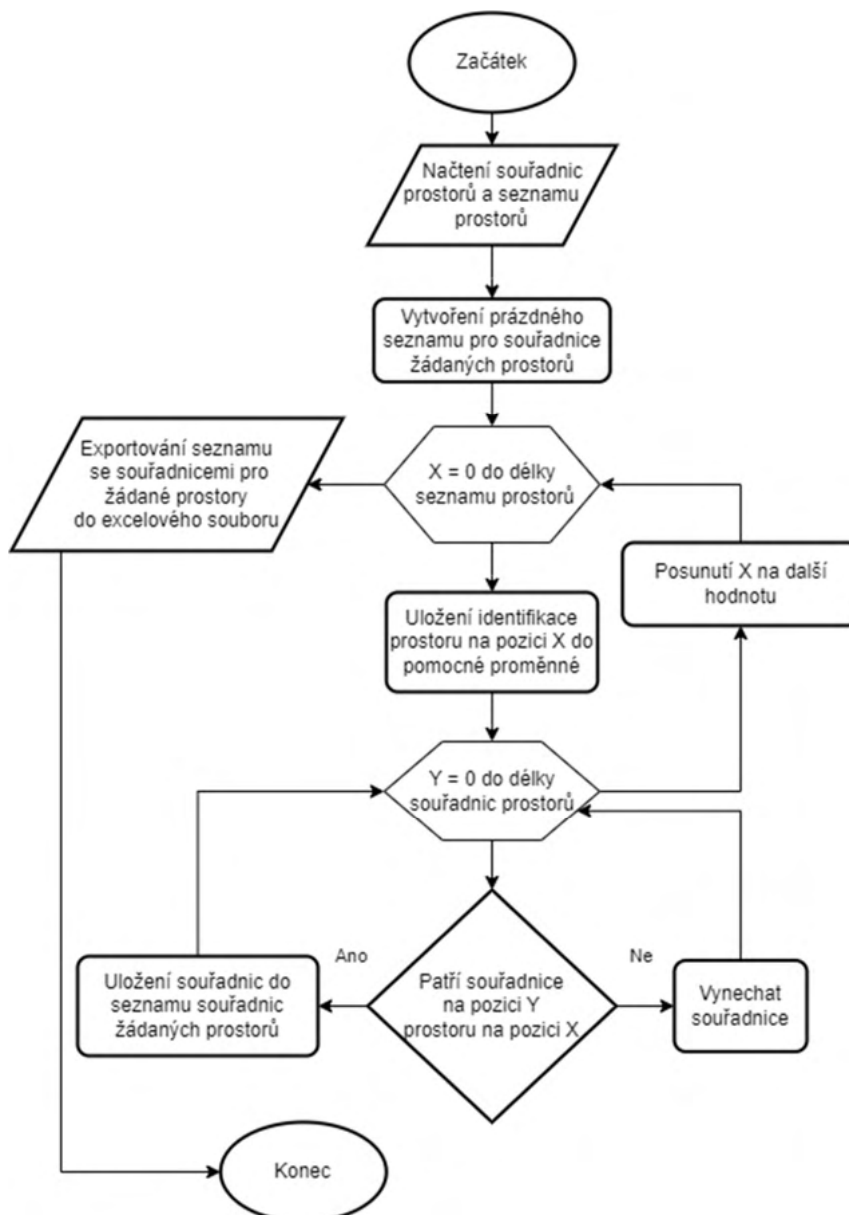
V následujícím kroku bylo třeba zvolit vhodný přístup. Nabízely se dvě možnosti: sjednocení jednotlivých FIRů do velkých národních vzdušných prostorů, které by se dále používaly v programu, nebo zkouška ponechání FIRů v původní podobě a ověření, zda jsou předchozí části softwaru schopny s těmito prostory pracovat. Nakonec byla zvolena druhá možnost, což zahrnovalo počáteční vyčištění datového souboru od všech nepotřebných prostorů. Nepotřebnými prostory byly považovány mezinárodní prostory nad Atlantickým oceánem a oblastech okolo sousedících zemí, jako jsou země severní Afriky a Blízkého východu. Tato rozhodnutí byla motivována tím, že tyto oblasti nespádají do rámce území Evropy, na něž se zaměřuje softwarové řešení.

Prvním krokem bylo sestavení seznamu vzdušných prostorů, které byly nezbytné pro další fáze vývoje softwaru. Počáteční excelový soubor obsahoval více než dvacet tisíc záznamů s geografickými souřadnicemi hranic FIRů. Aby byl vytvořen seznam potřebných FIRů, použila se funkce pro odstranění duplicitních záznamů v rámci excelového souboru na sloupec s identifikátory jednotlivých FIRů. Tím vznikl seznam obsahující všechny jedinečné vzdušné prostory, které byly k dispozici v souboru FIRů.

Dalším krokem bylo určení, které z těchto prostorů budou dále použity. Pro tento účel byl vzat seznam FIRů [49] [50], který obsahoval informace o vzdušných prostorech na celém světě a jejich příslušnosti ke konkrétním zemím. Na základě těchto informací byl ručně vytvořen seznam potřebných FIRů.

Samotný algoritmus pro tuto operaci byl složen z dvojitého cyklu typu "for" [51]. Na začátku byla vybrána první identifikace vzdušného prostoru ze seznamu

potřebných prostorů a uložena do pomocné proměnné. Následně byla ve zdrojovém kódu softwaru použita podmínka, která kontrolovala, zda identifikace souřadnice hranice FIRu na aktuálním řádku excelového souboru byla shodná s identifikací FIRu v pomocné proměnné. Pokud byla tato podmínka splněna, informace o daném FIRu z daného řádku byla uložena do seznamu, a to zahrnovalo identifikaci a souřadnice hranic tohoto prostoru. Tento proces byl opakován pro všechny řádky excelového souboru a všechny vybrané FIRy. Na konci této operace byly vytvořeny tři seznamy, první obsahující identifikace FIRů a dva obsahující příslušné geografické souřadnice jejich hranic.



Obr. 25 Vývojový diagram výběru souřadnic vzdušných prostorů

## Počáteční zpracování dat

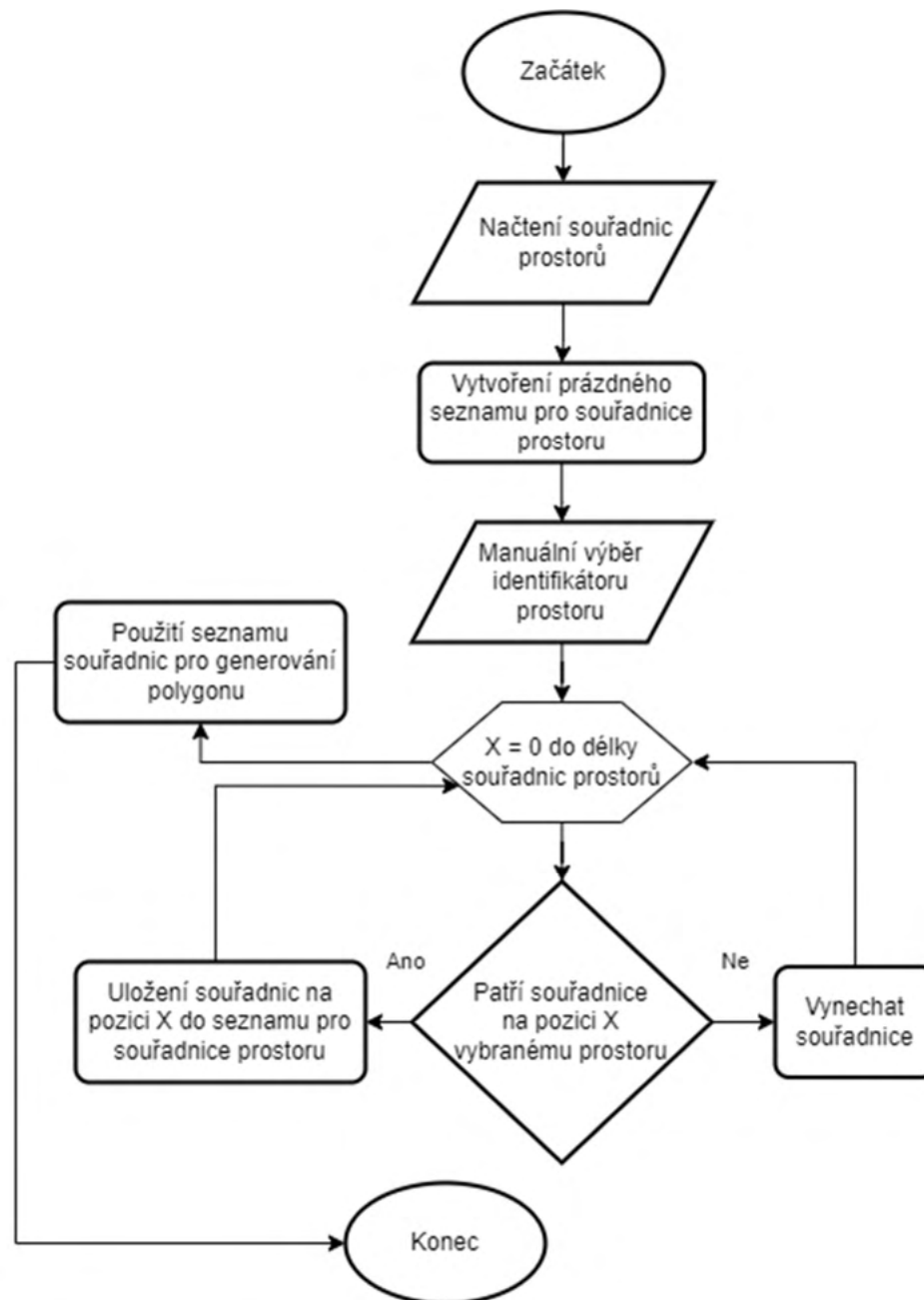
Z důvodu časové náročnosti procesu, který trval více než deset sekund při každém spuštění, byla vytvořena další část programu, která měla za úkol uložit tři vytvořené seznamy do nového excelového souboru. Každý seznam měl odlišný název a software byl schopen vytvořit excelový soubor, do něhož byly uloženy informace z těchto seznamů podle předem určeného pořadí. Do prvního sloupce excelu byly vloženy všechny identifikátory FIRů, do druhé sloupce všechny zeměpisné šířky všech FIRů a do posledního sloupce excelu byly vloženy zeměpisné výšky všech FIRů. Data byla do excelu vkládána takovým způsobem, že nedošlo k jejich změně a jednotlivé hodnoty zeměpisných souřadnic patřily ke správným identifikátorům FIRů.

Všechny části této operace fungovaly správně, a tak byl vytvořen excelový soubor obsahující požadované evropské vzdušné prostory. Po dokončení této fáze byl počet záznamů v excelovém souboru snížen na sedmnáct tisíc. Manuálně byla provedena kontrola, zda se identifikace nežádoucích vzdušných prostorů nenachází ve vytvořeném souboru, a také byla provedena kontrola samotných geografických souřadnic. Všechny kontroly byly úspěšné, a výsledný excelový soubor neobsahoval žádné nežádoucí vzdušné prostory.

### 3.1.4 Prostorové ověřování dat s reálnými prostory

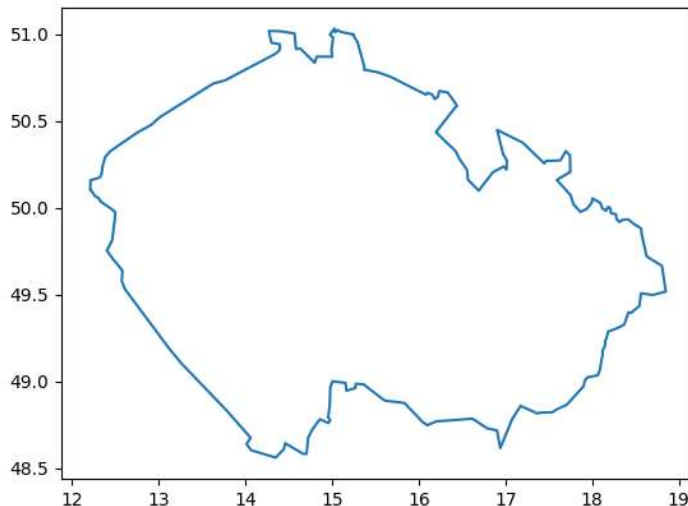
V této fázi tvorby softwaru bylo hlavním cílem vytvořit program, který by byl schopen určit, zda se určitý bod nachází v některém ze vzdušných prostorů a následně určit, v jakém prostoru se nachází. K dosažení tohoto cíle byly využity části zdrojového kódu z předchozích částí projektu, avšak bylo nutné provést určité modifikace.

Klíčovou otázkou bylo, zda funkce pro tvorbu polygonů bude schopna pracovat s velkým množstvím bodů, nebo zda bude třeba použít jinou knihovnu nebo metodu. Do nového softwaru byla zahrnuta část zdrojového kódu, která umožňovala načíst data z excelového souboru a uložit je do proměnných, konkrétně do seznamů. Následně bylo nutné provést testování, zda tato funkce pro tvorbu polygonů pracuje správně i s větším množstvím bodů. Za tímto účelem byl vytvořen cyklus, který umožnil vytvořit seznam bodů pro konkrétní vzdušný prostor. Identifikátor tohoto prostoru byl manuálně určen. Dále byly použity data z excelového souboru, kde byl vybrán specifický prostor, jehož souřadnice byly následně uloženy do seznamu. Tento seznam byl poté použit pro generování polygonu.



Obr. 26 Vývojový diagram výběru souřadnic specifického prostoru

Na následujícím obrázku je patrný výstup z vyvinutého softwaru. Software byl schopen vytvořit specifický polygon, který je reprezentován velkým množstvím bodů. Tento výsledek potvrdil schopnost vytvořených funkcí a částí zdrojového kódu pracovat s novými vzdušnými prostory, které jsou charakterizovány značným množstvím bodů a vykazují větší složitost.



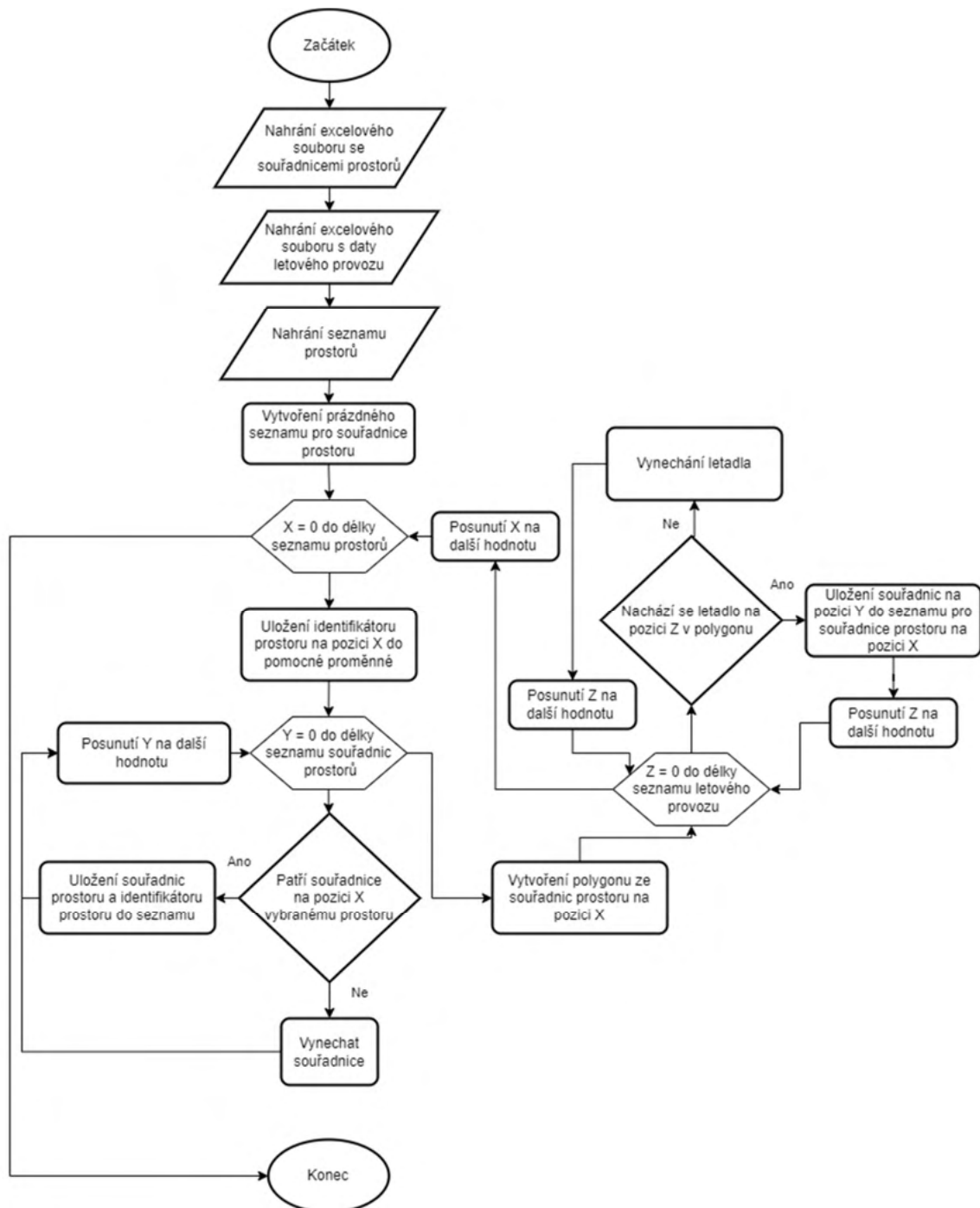
Obr. 27 Prvotní vizualizace vzdušného prostoru

Následujícím krokem bylo provést testování, zda budou předchozí části software schopny ověřit, zda se konkrétní bod nachází v určitém leteckém prostoru. Tato fáze se převážně opírala o opakované využití existujících funkcí a zdrojového kódu z předchozích dílčích částí projektu. Nicméně bylo nezbytné upravit logiku algoritmu, protože v této fázi se pracovalo s velkým množstvím leteckých prostorů, nikoliv s jediným.

Z předešlých částí projektu byla znovu použita část, která se zabývá načítáním dat z excelového souboru, výběrem konkrétního letového prostoru z rozsáhlého seznamu všech dostupných prostorů a získáním seznamu bodů tvořících hranice daného prostoru. Také byly zachovány funkce pro vytváření polygonů a ověřování, zda se konkrétní bod nachází v daném polygonu.

Nejprve byly z excelového souboru načteny informace o FIRech a uloženy do seznamů. Následně byly ručně vybrány body v daných prostorech a uloženy do seznamu bodů, na kterých bude program testovaný. Tyto body byly vybrány pomocí Google maps [47] a byly vybrány, tak aby se nacházeli v několika rozdílných prostorech. Poté byl vytvořen rozsáhlý algoritmus, složený z několika cyklů a podmínek. Algoritmus pracoval tak, že nejprve vybral identifikátor určitého FIRu ze seznamu dostupných prostorů. Poté získal všechny body příslušící tomuto prostoru a vytvořil s nimi polygon. Poté následovala kontrola, při níž byl postupně ověřen každý z dříve vybraných bodů, zda se nachází v daném leteckém prostoru. Pokud bylo ověřeno, že určitý bod patří do daného prostoru, byl přidán do seznamu bodů přiřazených k tomuto prostoru. Tato procedura byla opakována pro všechny vybrané body. Jakmile byly všechny body

zkontrolovány pro konkrétní prostor, algoritmus přešel na další iteraci a vybral nový identifikátor prostoru. Pro tento nový prostor byly opět získány všechny body hranice a s nimi byl vytvořen nový polygon. Všechny body, které ještě nebyly přiřazeny k předchozímu prostoru, byly testovány pro tento nový prostor a v případě pozitivního výsledku byly přiřazeny k tomuto novému prostoru s odpovídajícím identifikátorem. Touto metodou byly všechny letecké prostory postupně projety a všechny body reprezentující letový provoz.



Obr. 28 Vývojový diagram přiřazování letadel k prostorům



Jako výstup byl seznam bodů a identifikátorů prostorů, ve kterých se body nacházejí. Jelikož byly všechny body pro kontrolu předem vybrány, tak bylo možné předem určit do jakých prostorů měli jednotlivé body patřit. Po kontrole výsledků bylo zjevné, že program svoji funkci plní správně a body přiřadil ke správným prostorům. Program byl v daný moment schopný načíst data několika bodů a určit v jakých prostorech se nacházejí.

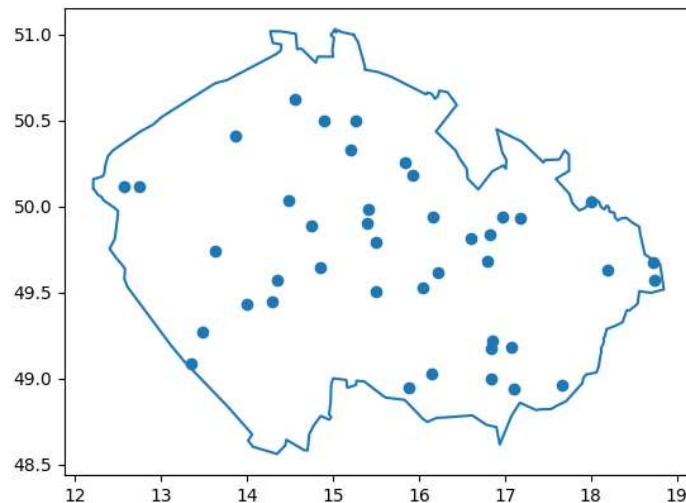
### **3.1.5 Vizualizace reálných prostorů s reálnými daty**

Další fází vývoje programu bylo využití reálných dat letového provozu s cílem rozdělit tyto body do jednotlivých leteckých prostorů a následně vizualizovat jeden konkrétní prostor spolu se všemi body, které se v něm nachází. Tato etapa opět využila předešlé komponenty programu, ale vyžadovala určité modifikace a úpravy.

Prvním krokem bylo získání dostatečného množství dat týkajících se reálného letového provozu. Pro tento účel byla využita OpenSky Network [42] databáze. Prostřednictvím nástroje Putty [43] byly staženy stovky záznamů o leteckém provozu, které byly následně uloženy do excelového souboru. Poté byla vytvořena část programu, která tyto data načítala do několika seznamů. Tyto seznamy obsahovali informace ohledně identifikátoru letadla a následně jeho zeměpisných souřadnic.

Dalším krokem byla ruční volba konkrétního letového prostoru, který měl být vizualizován, a získání všech bodů, které se v tomto prostoru nacházely. Poté byly použity existující funkce programu pro načítání dat o jednotlivých FIRech z excelového souboru. Následně byl vytvořen seznam bodů a prostorů, ve kterých se tyto body nachází.

V dalším kroku byly vybrány souřadnice hranic konkrétního letového prostoru, na jejichž základě byl vytvořen polygon. Následně byly vybrány body, které se v daném FIRu nachází, a byly umístěny do nového seznamu. Nakonec byly využity předchozí funkce programu pro provedení samotné vizualizace vybraného FIRu.



Obr. 29 Vizualizace prostoru s letadly

Program byl schopen úspěšně zpracovat zadaný úkol. Vytvořil polygon České republiky a následně provedl jeho vizualizaci. Program do vizualizace zahrnul všechny body, které se v tomto prostoru nacházely. Důkladný test programu byl také proveden na dalších leteckých prostorech, a ve všech případech probíhala vizualizace bezchybně.

Kontrola přesnosti pozice bodů, v rámci FIRů, byla prováděna na FIREch, které v souboru dat bodů letového provozu neměli žádné body. Následně bylo do seznamu bodů letového provozu manuálně přidáno několik bodů na velmi specifických pozicích v těchto prázdných FIREch. Jeden takový prostor byl například Finský prostor EFIN. Několik bodů bylo ručně přidáno do souboru dat letového provozu, přičemž se jednalo o body umístěné na přesných pozicích v rámci prostoru, aby bylo možné ověřit, zda se tyto body ve vizualizaci nacházejí na správných místech. Po provedení vizualizace bylo zřejmé, že všechny ručně vybrané body byly tam, v rámci Finského prostoru, kde se měly nacházet. Tento experiment byl opakován pro další prázdné prostory a vždy s pozitivními výsledky.

### 3.1.6 Tvorba národních vzdušných prostorů

Následující etapa projektu byla zasvěcena vývoji softwaru umožňujícího sjednocení vzdušných prostorů. Důležitým aspektem bylo spojení jednotlivých prostorů, které byly uvedeny v souboru dat FIRů poskytnuté EUROCONTROLEM [48]. Tato sada obsahovala všechny FIRy v Evropě. Cílem této fáze bylo spojení vybraných FIRů, aby vznikly velké národní vzdušné prostory, jako například sjednocení tří německých FIRů do jednoho velkého, který

by zahrnoval celé území Německa. Tato část programu byla považována za vedlejší a neměla své místo ve finálním softwaru.

Prvním krokem byla úprava excelového souboru obsahujícího informace o vzdušných prostorech a jejich hranicích. Identifikátory jednotlivých prostorů se skládaly ze 7 písmen, kde prvních 4 písmena označovala FIR a další 3 písmena byla doplňková a označovala typ prostoru, jako letová informační oblast (FIR) a horní informační oblast (UIR). Excelový soubor byl upraven tak, že byly vymazány tři doplňková písmena, což umožnilo programu správně načítat a zpracovávat tyto prostory. Po této úpravě byl vytvořen nový excelový soubor obsahující všechny souřadnice hranic jednotlivých vzdušných prostorů spolu s jejich identifikátory.

Druhým krokem bylo nezbytné vyřešit problematiku rozdílných typů prostorů v rámci identifikace vzdušných oblastí. V konkrétním případě se jednalo o FIRy a UIRy, které tvořily vzdušné prostory. Je důležité poznamenat, že některé země mohou mít FIRy a UIRy, které jsou často totožné v rámci zeměpisných souřadnic jejich hranic.

U některých zemí se FIRy a UIRy shodují a mají identické hranice, což vytváří problém při sjednocování prostorů, jelikož algoritmus na sjednocení prostorů, není schopen fungovat s polygonem, který je definován souborem zeměpisných souřadnic, skládající se dvěma totožnými sadami zeměpisných souřadnic. Naopak, u jiných zemí může vzdušný prostor obsahovat více FIRů než UIRů, a někdy je tomu naopak. FIRy a UIRy jsou tvořeny čtyřmi identifikačními písmeny na začátku identifikace, což znamená, že program mezi nimi nedokáže rozlišit a načte data z obou typů prostorů jako FIR.

Aby bylo možné vytvářet správné polygony, bylo nezbytné provést důkladné odstranění UIR prostorů z excelového souboru, který obsahoval informace o vzdušných prostorech. Tímto opatřením byl software adaptován tak, aby pracoval pouze s FIRy, což vedlo ke správnému načítání a zpracování těchto prostorů.

12313	LIMMFIR	LIMM	FIR		46.67583	12.47722
12314	LIMMFIR	LIMM	FIR		46.8025	12.28111
12315	LIMMFIR	LIMM	FIR		46.825	12.30778
12316	LIMMFIR	LIMM	FIR		46.87083	12.28639
12317	LIMMFIR	LIMM	FIR		46.87722	12.21667
12318	LIMMFIR	LIMM	FIR		46.90639	12.15833
12319	LIMMFIR	LIMM	FIR		47	12.12778
12320	LIMMFIR	LIMM	FIR		47.025	12.19167
12321	LIMMFIR	LIMM	FIR		47.06667	12.23333
12322	LIMMFIR	LIMM	FIR		47.08694	12.18889
12323	LIMMUIR	LIMM	UIR		47.08694	12.18889
12324	LIMMUIR	LIMM	UIR		47.04722	11.98889
12325	LIMMUIR	LIMM	UIR		47.01611	12.28111
12326	LIMMUIR	LIMM	UIR		47.00278	11.855
12327	LIMMUIR	LIMM	UIR		47.01694	11.75083
12328	LIMMUIR	LIMM	UIR		47.01722	11.69028
12329	LIMMUIR	LIMM	UIR		47.01833	11.52639

Obr. 30 Ukázka FIR a UIR prostorů v datech

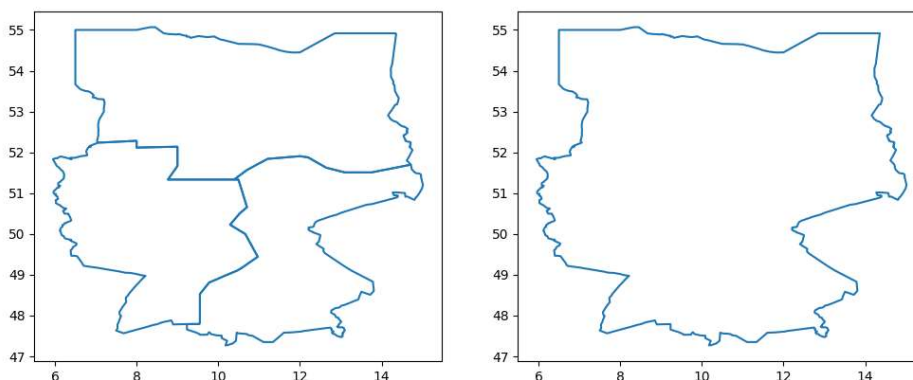
V následující etapě projektu byl vyvíjen software určený pro sjednocení vzdušných prostorů. Pro tuto úlohu byla zvolena knihovna Shapely [52], což je knihovna s bohatým souborem funkcí a zároveň široce využívaná v oboru s mnoha dostupnými informacemi a návody.

Prvním krokem při tvorbě tohoto vedlejšího softwaru bylo vytvoření části, která umožňovala načítat data z excelového souboru. Následně musel program vybrat konkrétní vzdušné prostory z tohoto excelového souboru a ukládat je do seznamů v rámci programu. Mnoho částí zdrojového kódu bylo již vytvořeno, což znamenalo především kopírování již existujících částí. Na konci však byly nutné určité úpravy, aby byly vzdušné prostory nahrány ve formátu kompatibilním s funkcemi knihovny Shapely [52]. Tato část kódu byla vytvořena úspěšně a byla provedena kontrola porovnáním výstupů a ověření, zda jednotlivé prostory obsahují body uvedené v excelovém souboru.

Dalším krokem bylo vytvoření kódu, který pro všechny vybrané prostory vytvořil polygony. Knihovna Shapely [52] sjednocuje prostory pomocí polygonů, takže bylo nutné přepracovat kód tak, aby vytvářel více polygonů najednou.

Posledním krokem bylo vytvoření funkce pro sjednocení těchto polygonů. Pro tento účel byla použita funkce z knihovny Shapely s názvem "unary\_union" [52]. Všechny polygony byly uloženy do jedné proměnné typu seznam, a tato proměnná byla použita v již zmíněné funkci. Výstupem byly zeměpisné souřadnice nových hranic. Proto bylo důležité vytvořit vizualizaci, která by nejprve zobrazila jednotlivé prostory a následně by zobrazila sjednocený prostor. Tato část byla již

zpracovaná, a proto šlo pouze o lehké úpravy zdrojového kódu. Po provedení veškerých úprav v programu a v excelu se zeměpisnými souřadnicemi hranic všech FIRů, program fungoval správně a vytvořil sjednocený prostor, který byl následně vizualizován.



Obr. 31 Ukázka sjednocení vzdušných prostorů Německa

Po úspěšném sjednocení vzdušného prostoru následovalo sloučení vzdušných prostorů dalších zemí, včetně Francie, Ukrajiny, Itálie a Španělska. Pro tyto země byly vytvořeny jednotné vzdušné prostory, které pokrývaly celé jejich území. Tímto krokem se zajistilo, že každá země měla jeden souvislý vzdušný prostor namísto několika menších prostorů.

Po sjednocení všech vzdušných prostorů zemí, které měly své vzdušné prostory dříve rozděleny na menší části, byl vytvořen finální excelový soubor. V tomto souboru byly jednotlivé země reprezentovány třímístným identifikátorem spojeným s jejich názvem. Jako identifikátory pro jednotlivé země byly použity třímístné zkratky v souladu s mezinárodním standardem Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) [53]. Tyto standardizované třímístné zkratky byly zvoleny pro reprezentaci jednotlivých zemí v rámci softwaru a poskytovaly jednoznačnou identifikaci každé země. Tento nový excelový soubor byl mnohem menší než původní, obsahující méně než 9 tisíc řádků dat. Snížení počtu řádků přineslo výhodu rychlejšího zpracování softwaru. Proces kontroly, ve kterém vzdušném prostoru se nachází určitý bod, byl zkrácen z více než 10 sekund na pouhé 2 sekundy.

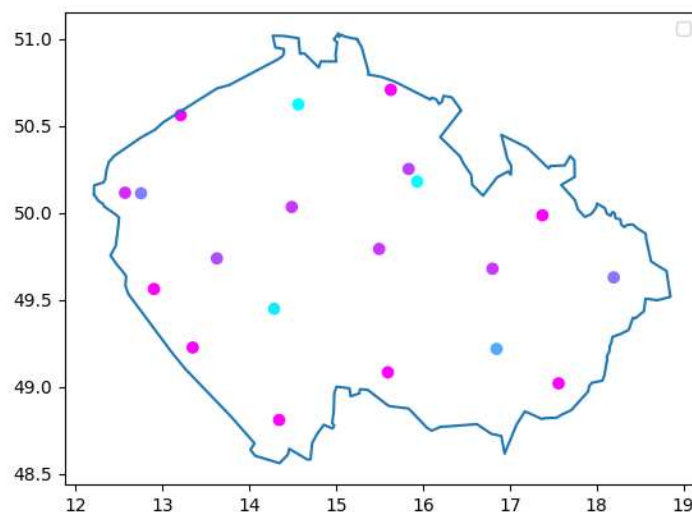
Po dokončení této části byl celý software schopen načítat data z reálného letového provozu a přiřazovat jednotlivá letadla k odpovídajícím vzdušným prostorům, ve kterých se nacházela. Tím byla dokončena fáze integrace reálných dat vzdušných prostorů do softwaru.

### 3.1.7 3D vizualizace

V této fázi vývoje bylo nezbytné přistoupit k rozšíření stávajícího 2D vizualizačního modelu o 3D funkcionalitu. Jelikož se aplikace týkala letového provozu, což má výrazný 3D charakter v reálném světě, stal se tento krok nezbytnou pro dosažení komplexního a realistického zobrazení. Pro implementaci 3D vizualizace byla navržena nová část programu.

Aby se zjednodušila provizorní fáze rozvoje 3D vizualizace, byla vytvořena dočasná funkce, která náhodně přiřazovala jednotlivým bodům letové hladiny v rozmezí od 100 do 300 s kroky po 10. Toto opatření mělo za cíl umožnit testování 3D vizualizace s předpokladem, že později budou přidány skutečné výškové údaje k jednotlivým bodům z reálných dat o leteckém provozu.

Pro načítání a tvorbu polygonů a rozdělení jednotlivých bodů do jednotlivých prostorů byly znovu použity části kódu, které již byly dříve vytvořeny a prověřeny. Docházelo tak k opětovnému využití stávajících funkcí a zdrojových kódů. Primárním cílem v této fázi byla realizace 2D vizualizace, ve které by každý bod byl vizualizován barvou odpovídající přiřazené letové hladině.

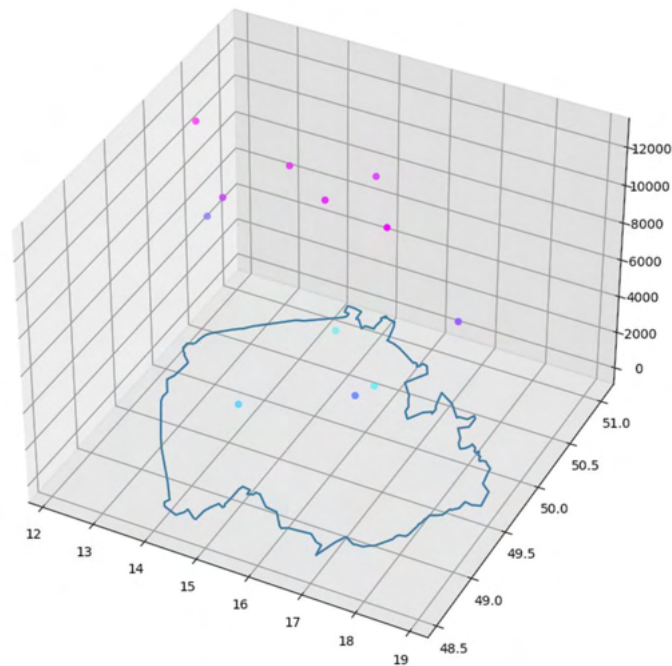


Obr. 32 Vizualizace letadel a jejich výšek

Následujícím krokem v procesu vývoje bylo upgradování vizualizace tak, aby byla zobrazena ve 3D prostoru. Vzhledem k třetímu rozměru nebylo nutné provádět barevné odlišení, jelikož by výška byla nyní jedním z hlavních vizuálních faktorů. Pro 2D zobrazení byla původně využita knihovna Matplotlib [46].

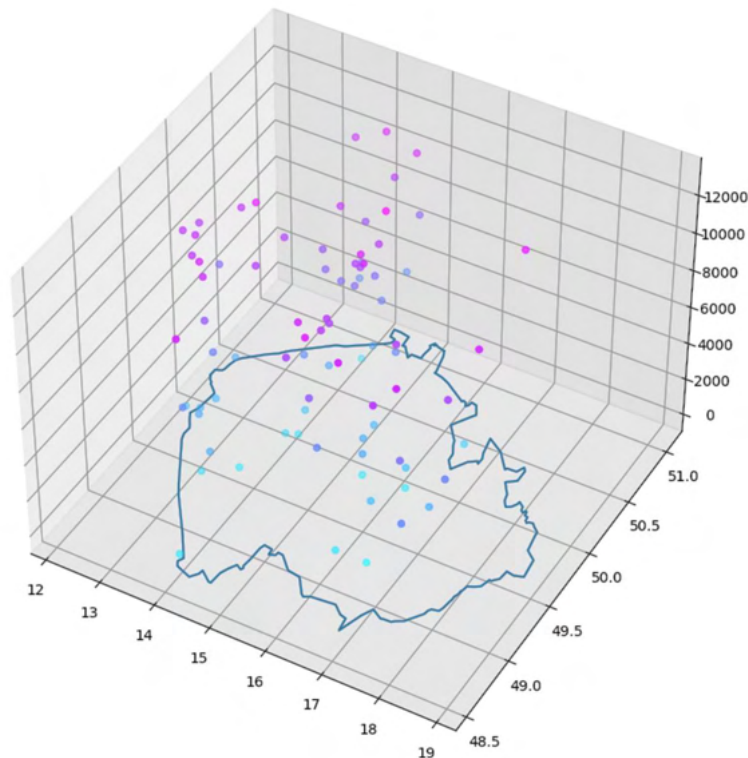
Vzhledem k tomu, že knihovna Matplotlib [46] neposkytla potřebné prostředky pro efektivní tvorbu 3D vizualizace, bylo rozhodnuto přejít na jinou vizualizační

knihovnu. Jako náhradní vizualizační knihovna byla vybrána knihovna PlotLy [54], která je také jedna z nejvyužívanějších. S pomocí veřejně dostupných informací týkajících se této knihovny bylo možné vytvořit 3D vizualizaci. Na rozdíl od předchozích pokusů, v této knihovně nevznikaly žádné závažné chyby nebo problémy, a 3D vizualizace byla úspěšně vypracována. V této fázi byla také využita 2D barevná vizualizace, aby bylo možné ověřit správnost výšek jednotlivých bodů a porovnat je.



Obr. 33 První 3D vizualizace dat

Na výše uvedeném obrázku, což představuje jednu z prvních 3D vizualizací, jsou zobrazeny body s náhodně vybranými výškami. Tento krok byl následován integrací dat o výškách jednotlivých bodů do samotného programu, což byl relativně jednoduchý proces, protože výšková data byla již obsažena v excelovém souboru spolu s geografickými souřadnicemi, přičemž byla uložena v samostatném sloupci. S využitím existujících částí kódu byla provedena operace načtení a uložení těchto výškových dat do proměnné typu seznam. Následně bylo z excelových dat odstraněno náhodné přiřazování letových hladin a nově byla zavedena osa Z v rámci funkce pro 3D vykreslování, která využila tato nová výšková data.



Obr. 34 3D vizualizace s reálnými výškami

### 3.1.8 Clusterování a generování nového letového provozu

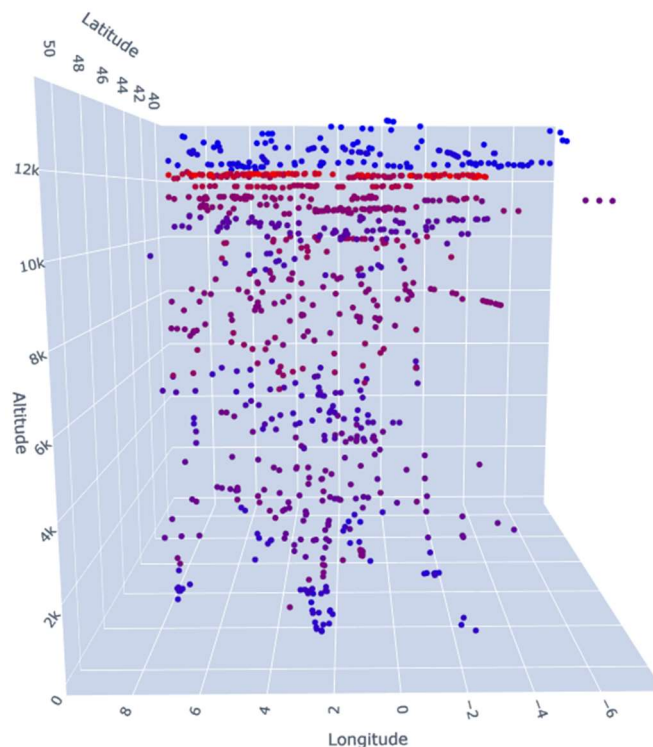
Cílem této části diplomové práce bylo vytvoření části softwaru, která by poskytovala funkci pro vytváření clusterů v datech letového provozu. Tato část byla zapotřebí pro zachování podoby nově generovaného letového provozu jako reálného letového provozu. Pokud se předpokládá zvýšený provoz na základě historického letového provozu, je možné předpokládat, že zvýšený letový provoz bude mít stejnou nebo velice podobnou distribuce letadel v prostoru. Proces clusterování je prováděn na základě pozice jednotlivých letadel v prostoru a jejich vzájemných vzdáleností.

Tvorba této části softwaru využívá části vytvořené v předchozích krocích jako nahrávání a filtrace dat a také jejich vizualizace. Jako první krok bylo nutné vybrat clusterovací metodu, na základě které bude software vytvářet clustery. Jelikož nebylo možné určit, která z metod by vytvářela optimální clustery pro generování předpovědí letového provozu, byly vytvořeny 3 modely. Všechny 3 vytvořené modely byly identické, lišily se pouze v clusterovacím algoritmu, pomocí kterého se vytvářeli samotné clustery. Clusterovací algoritmy, které byly vybrány pro modely, byly algoritmus K-means, HDBSCAN a GMM. Jedná se



o jedny z nejvíce využívaných clusterovacích algoritmů napříč všemi typy clusterovacích metod. Jelikož mají všechny modely odlišné clusterovací algoritmy, pracující na odlišných clusterovacích metodách, tak finální vytvořené clustery budou rozdílné ve všech třech modelech.

Po vytvoření všech modelů bylo nutné otestovat reálná data letového provozu. Došlo tedy ke stažení vzorku dat a jeho následné vložení do modelů a vytvoření clusterů. Poté už byly samotné clustery pouze vizualizovány.



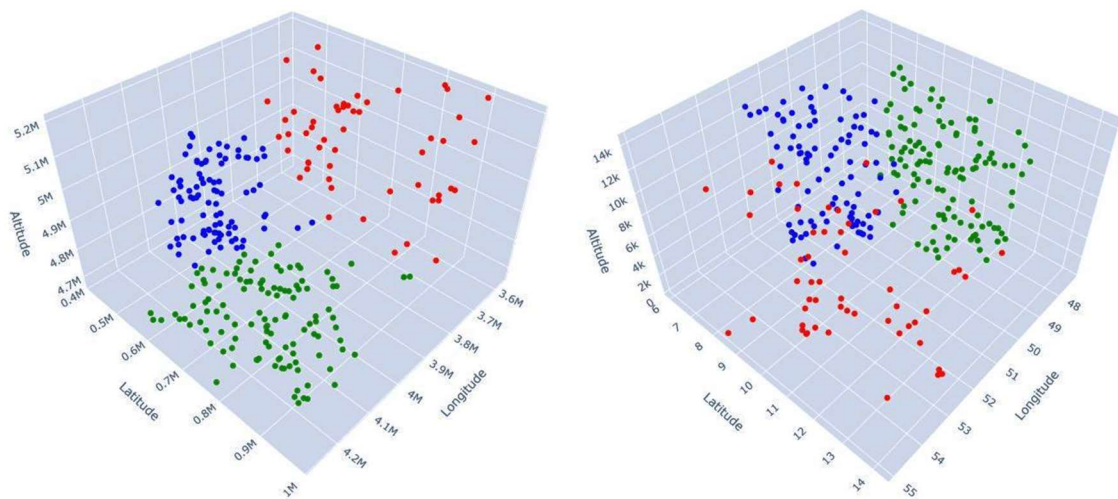
Obr. 35 Clusterování s původními souřadnicemi

Na základě zkoumání modelů, jak je znázorněno na přiloženém obrázku, bylo pozorováno konzistentní generování clusterů, uspořádaných vrstevitě. Tento proces byl způsoben původním formátem souřadnic letadel v geodetických souřadnicích, konkrétně ve stupních zeměpisných šířek a výšek, a výšky letadel vyjádřených v metrech nad povrchem. Během generování clusterů se clusterovací algoritmus zaměřoval na výšku, což byl dominantní parametr při výpočtu vzdáleností, vedoucí ke vzniku clusterů uspořádaných po vrstvách. K překonání tohoto problému bylo nezbytné převést souřadnice na jednotky, které by rovnoměrně zohledňovaly všechny parametry a eliminovaly jejich nerovnováhu při výpočtech vzdáleností.

V rámci dalšího průzkumu byly identifikovány dvě možná řešení. Prvním přístupem byla standardizace dat, což zahrnovalo uniformizaci všech pozičních

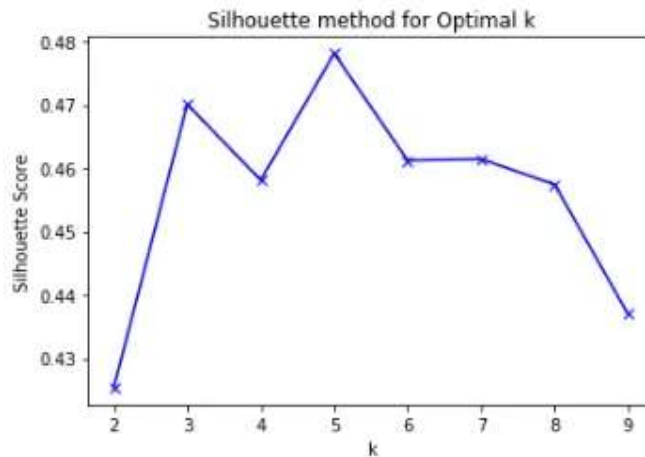
dat letového provozu tak, aby všechny parametry měly stejnou váhu při výpočtech vzdáleností. Druhým přístupem bylo využití souřadnicového systému země-střed, země-fixní (ECEF). Toto řešení předpokládalo převedení všech souřadnic do souřadnicového systému ECEF prostřednictvím specializované knihovny `pymap3d` [55], která poskytuje funkce pro přesné transformace mezi geodetickým systémem a systémem ECEF.

Obě tyto řešení poskytovala výhody i nevýhody, ale metoda, se kterou by se dále pracovalo, byla metoda ECEF. Následně byly všechny modely upraveny tak, aby před clusterovací fází byly převedeny geodetické souřadnice na ECEF souřadnice. Poté bylo provedeno několik testování, u kterých bylo skrze vizualizace kontrolovány vytvořené clustery v ECEF souřadnicích s vytvořenými clustery v geodetických souřadnicích.



Obr. 36 ECEF vs Geodetické clusterování

Po dokončení testování nově převedených souřadnic letadel bylo nutné vyřešit problematiku parametrů clusterovacích algoritmů. Algoritmus K-means, HDBSCAN a GMM vyžadují definování určitých parametrů předtím, než vytvoří samotné clustery. Při testování několika sad dat letových provozů v rámci několika odlišně velikostních zemí bylo zjevné, že tento přístup není možný. Každá země má specifický prostor tvarově i velikostně a samotný letový provoz má jinou velikost i distribuci. Není možné pro všechny typy prostorů a letových provozů vytvořit jednu sadu parametrů, která by vytvářela optimální clustery. To vedlo k potřebě vyhledat metody pro výběr optimálního počtu clusterů, jako je Silhouette metoda, která umožňuje určit optimální počet clusterů v závislosti na konkrétních charakteristikách a potřebách pro každý konkrétní letový provoz a prostor [56] [57].

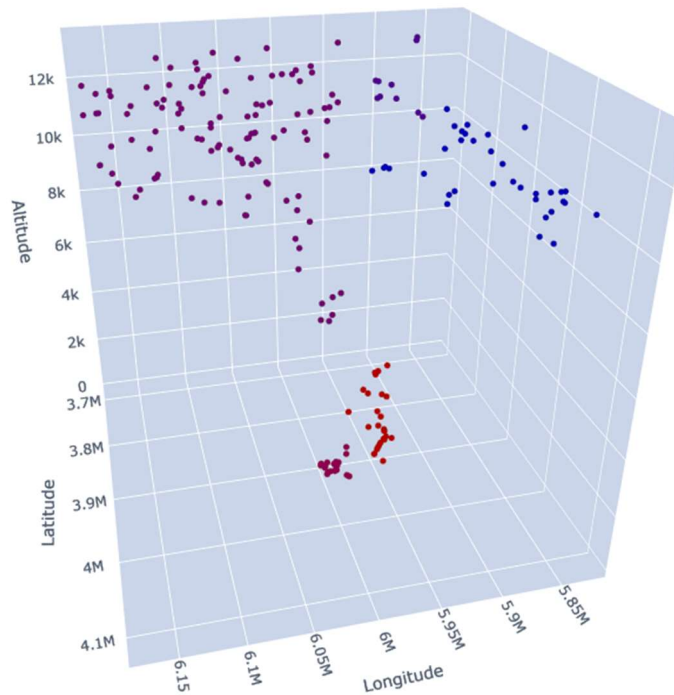


Obr. 37 Graf výběru optimálního parametru Silhouette metody [58]

Silhouette metoda hodnotí kvalitu clusterování pro každý bod v souboru dat, vypočítává "Silhouette koeficient" na základě vzdáleností mezi body v různých clusterech a určuje, jak dobře jsou body zařazeny do svých clusterů. Optimální počet clusterů je určen tak, aby Silhouette koeficient pro všechny clustery byl co nejvyšší.

Pro algoritmy HDBSCAN, K-means a GMM se Silhouette metoda používá k určení optimálního počtu clusterů a k posouzení míry podobnosti mezi jednotlivými body v těchto clusterech.

- **Pro HDBSCAN:** Software využívá Silhouette metodu k určení optimálních hodnot parametrů "min\_cluster\_size" a "min\_samples". Parametr "min\_cluster\_size" určuje minimální počet bodů nutný k vytvoření clusteru, zatímco "min\_samples" určuje minimální počet sousedů, které musí bod mít, aby byl považován za jádro. Jádrové body jsou klíčovými body v clusterech a určují, jaké body budou součástí clusterů. Silhouette metoda pomáhá nalézt optimální kombinaci těchto parametrů tak, aby maximalizovala kvalitu clusterování.
- **Pro K-means:** Software používá Silhouette metodu k určení optimálního počtu clusterů. Vyšší Silhouette skóre indikuje lepší clusterování, a proto se hledá takový počet clusterů, který maximalizuje tuto hodnotu. K-means algoritmus je následně použit s tímto optimálním počtem clusterů.
- **Pro GMM:** Software používá Silhouette metodu k určení optimálního počtu komponent pro model GMM. Každá komponenta modelu GMM představuje jeden cluster v datech. Výběr optimálního počtu komponent je klíčovým krokem, protože určuje, kolik clusterů bude v souboru dat.



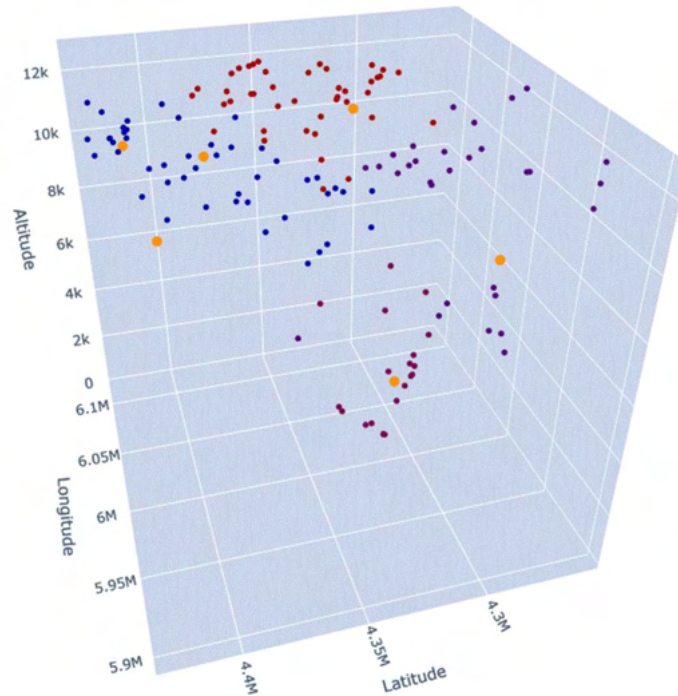
Obr. 38 Vizualizace za použití Silhouette metody

Na obrázku výše je možné vidět vzorek letového provozu na území Polska za použití optimalizačních metod. Testování bylo provedeno na několika setech dat letových provozů a prostorů. Výsledné clustery byly vždy optimální a ve výsledných clusterech se nikdy nenacházel žádný extrémní cluster, jako tomu bylo bez Silhouette metody.

Jako další krok bylo vytvoření funkce, která by ve vytvořených clusterech generovala body nové. Pro generování nových bodů bylo důležité, aby byla zachována struktura a charakteristika původního souboru dat. Za tímto účelem bylo využito Gaussovského modelu směsi. Jeho použití pro generování nových dat v jednotlivých clusterech zaručuje, že struktura a charakteristika dat s nově generovanými body, se bude co nejvíce blížit struktuře a charakteristice původního souboru dat.

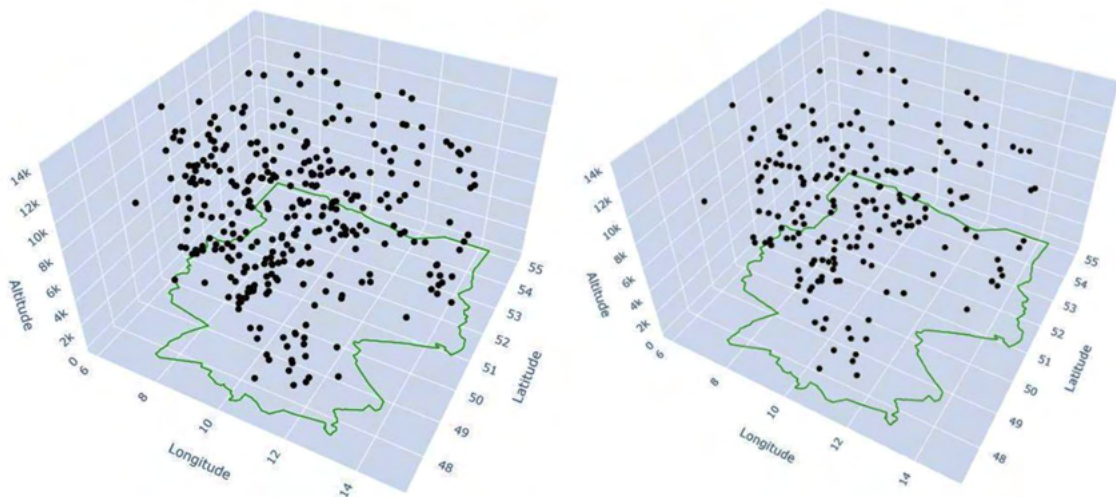
Při tvorbě generovací části byla zpracována část programu, která poskytovala možnost zvolit procentuální hodnotu nárůstu bodů. Tuto část bylo nutné vytvořit pro dvě možnosti a to kladné procentuální hodnoty a negativní procentuální hodnoty, jelikož letový provoz se může jak zvýšit, tak snížit. V rámci kladných procentuálních hodnot by došlo k výpočtu zvolené procentuální hodnotě vůči celkovému počtu bodů v prostoru. Poté co byla získána hodnota nově generovaných bodů, bylo nutné tuto hodnotu rozpočítat mezi jednotlivé clustery.

Jelikož se v každém clusteru nachází jiný počet bodů, tak pro zachování proporcionality, počet nově generovaných bodů se lišil pro každý cluster.



Obr. 39 Vizualizace generování bodů

Pro druhou možnost, kdy by byla vložena do softwaru negativní procentuální hodnota, byla vytvořena funkce softwaru, která by z jednotlivých clusterů odstraňovala body. Odstraňování bodů by také podléhalo proporcionalitě ve velikosti clusterů a výběr bodů byl prováděn pomocí Gaussovského modelu směsi.



Obr. 40 Ukázka mazání 40% bodů

Na obrázku výše můžete vidět proces mazání bodů v rámci letového provozu v Německu, kdy bylo odstraněno 40 % letadel. V této fázi byl již vyvinutý

software, který dokázal vytvářet clustery a následně do těchto clusterů přidávat nové body nebo je odebírat.

## Rozstupy

Posledním krokem v této fázi bylo vytvoření algoritmu pro ověření splnění požadavků na horizontální a vertikální rozstupy pro nově generovaný letový provoz. Nový letový provoz byl generován pro jednotlivé clustery a následně modelován pomocí Gaussovského modelu směsi. Bylo nezbytné zajistit, že nový provoz nebude vytvářen příliš blízko již existujícího provozu.

Prvním krokem bylo stanovení minimálních horizontálních a vertikálních rozstupů. Tato kritéria byla odvozena z mezinárodních standardů pro letecké navigační služby uvedených v ICAO dokumentu 4444 [59]. Pro vertikální separační minimum byla zvolena hodnota 900ft, což je často používané pro většinu letového provozu. Pro horizontální separační minimum byla zvolena hodnota 5NM, což je standardní radarové separační minimum.

```
def is_valid_new_point(new_point, existing_points, generated_points, polygon, min_height_diff=300, min_horizontal_distance=9300):
    new_lat, new_lon, new_alt = ecef_to_geodetic([new_point[0]], [new_point[1]], [new_point[2]])

    if len(generated_points) > 0:
        existing_points = np.append(existing_points, generated_points, axis=0)

    for existing_point in existing_points:
        existing_lat, existing_lon, existing_alt = ecef_to_geodetic([existing_point[0]], [existing_point[1]], [existing_point[2]])

        height_diff = abs(new_alt[0] - existing_alt[0]) # Height difference in meters

        horizontal_distance = math.sqrt((new_point[0] - existing_point[0]) ** 2 + (new_point[1] - existing_point[1]) ** 2)

        if height_diff <= min_height_diff and horizontal_distance >= min_horizontal_distance:
            if is_point_inside_polygon((new_lat[0], new_lon[0]), polygon):
                return True

    return False # Not valid if no condition is met
```

Obr. 41 Zdrojový kód algoritmu na kontrolu rozstupů

Následně byly tyto parametry integrovány do samotného programu. Během generování nového letového provozu byla vytvořena podmínka pro akceptaci nového letadla. Tato podmínka zahrnovala kontrolu, zda se letadlo nachází v mezích definovaných nejmenší a největší vertikální výškou letového provozu. Pro zavedení kontrol horizontálních rozstupů bylo tedy nutné rozšířit tuto podmínku. Algoritmus pro ověření rozstupů pracoval na základě dvoustupňového procesu. Nejprve byl ověřen vertikální rozstup mezi nově vygenerovaným letadlem a již existujícím letovým provozem, včetně všech již vygenerovaných a akceptovaných letadel. Pokud nově vygenerované letadlo bylo vertikálně od některého letadla vzdálené méně než 900ft, byla prováděna kontrola druhého parametru, což je horizontální vzdálenost mezi letadly. Pokud nově vygenerované

letadlo bylo vzdálené méně než 900ft vertikálně od jiného letadla, byla vypočítána horizontální vzdálenost mezi těmito dvěma letadly. Pokud výsledná hodnota překročila 5NM, bylo nově vygenerované letadlo akceptováno. Jelikož software pracoval v metrické soustavě, vertikální separační minimum bylo určeno jako 300m a horizontální separační minimum jako 9,3km.

### 3.2 Validace

Validace programu byla provedena za pomoci metody porovnávání pozic letadel. Princip této metody se zakládal na porovnávání pozičních dat dvou souborů dat letového provozu. Nejdříve byl vzat určitý historický letový provoz pro specifickou zemi. Následně bylo z tohoto souboru dat vymazáno náhodnou metodou určitý počet letadel. Poté byl daný soubor dat letového provozu, ponížený o určitý počet letadel, znovu načten do programu. Byly vytvořeny clustery na základě nové skladby provozu a poté byly proporčně do těchto clusterů znovu vygenerovány původně vymazaná letadla. Tato letadla byla však v clusterech generována pomocí Gaussovského modelu směsi. Následně byl původní letový provoz vložen do validačního programu spolu se souborem dat s nově vygenerovanými letadly.

Jako další krok byl pro každý bod v souboru dat původního letového provozu nalezen nejbližší bod v druhém souboru dat. Jelikož byly všechny body, až na ty, které byly vymazány a následně znovu vygenerovány, na stejných pozicích, tak výsledná vzdálenost mezi nimi byla 0. Pro všechny body, které byly vymazány a následně znovu vygenerovány byla vzdálenost k jejich nejbližšímu bodu nenulová. Každý bod mohl být spárován pouze s jedním bodem, čili nebylo možné, aby více bodů bylo spojeno s jedním bodem. Poté co byly všechny body spárovány a jednotlivé vzdálenosti mezi body zapsány do seznamu, tak bylo možné oddělit všechny nulové vzdálenosti a pracovat pouze s nenulovými. Po ověření jestli počet nenulových hodnot souhlasí s počtem vymazaných a vygenerovaných letadel, bylo možné určit přesnost generování nových bodů po vypočítání průměrné hodnoty nenulových vzdáleností.

Tato metoda validace je schopná poskytnout určitou představu o přesnosti jednotlivých modelů a byla vybrána, jelikož poskytuje chybové hodnoty pouze pro letadla, která byla modifikována. Ve chvíli, kdyby se porovnával letový provoz v jeden moment ve stejný den v roce 2018 a 2019, tak by výsledná průměrná hodnota chyby generování letadel pokrývala všechny body, jelikož provoz by byl u obou souborů dat rozdílný.

Pro provedení validace bylo staženo 5 souborů dat z roku 2018 a 5 souborů dat z roku 2019. Každý soubor dat byl stažený z jiného měsíce. Jednalo se o měsíce leden, březen, květen, červenec a říjen, aby byla validace provedena na větším vzorku dat a nikoliv pouze na základě letního nebo zimního provozu. Pro každý model bylo tedy připraveno 10 souborů dat. 5 souborů dat pro zmíněných 5 měsíců v roce 2018 a 5 souborů dat pro zmíněných 5 měsíců v roce 2019. Všechny dny byly vybrány tak, aby reprezentovaly stejný den v rámci měsíce v roce 2018 i 2019. Jedná se tak například o první pátek měsíce nebo druhé pondělí v měsíci. Soubory dat se skládaly vždy z rozpětí 2 sekund a to od 8:00:00 do 8:00:02 UTC. Následně došlo k výběru deseti zemí pro, které bylo testování provedeno. Země byly vybrány tak, aby byly zastoupeny větší i menší země. Mezi vybrané země patřila Belgie (BEL), Česká republika (CZE), Francie (FRA), Německo (GER), Polsko (POL), Maďarsko (HUN), Itálie (ITA), Řecko (GRC), Portugalsko (POR) a Rumunsko (ROM). Pro každý model tak bylo provedeno dohromady 100 měření, 10 měření pro každou zemi pro 10 zmíněných souborů dat. Všechny měření byly prováděny stejným způsobem, a to prvotním uložením původního letového provozu a následným náhodným vymazáním 10 % letadel. Následně byl tento ponížený provoz znovu vložen do programu a došlo k vytvoření clusterů z letového provozu a bylo znovu vygenerováno 10 % vymazaných letadel za pomoci Gaussovského modelu směsi.

V dalším kroku byl soubor dat s původním provozem a soubor dat s pozměněným provozem vložen do validačního programu, který byl schopný vypočítat rozdíly ve vzdálenostech u jednotlivých bodů a také vypočítat průměrné chybové hodnoty při generování letadel.



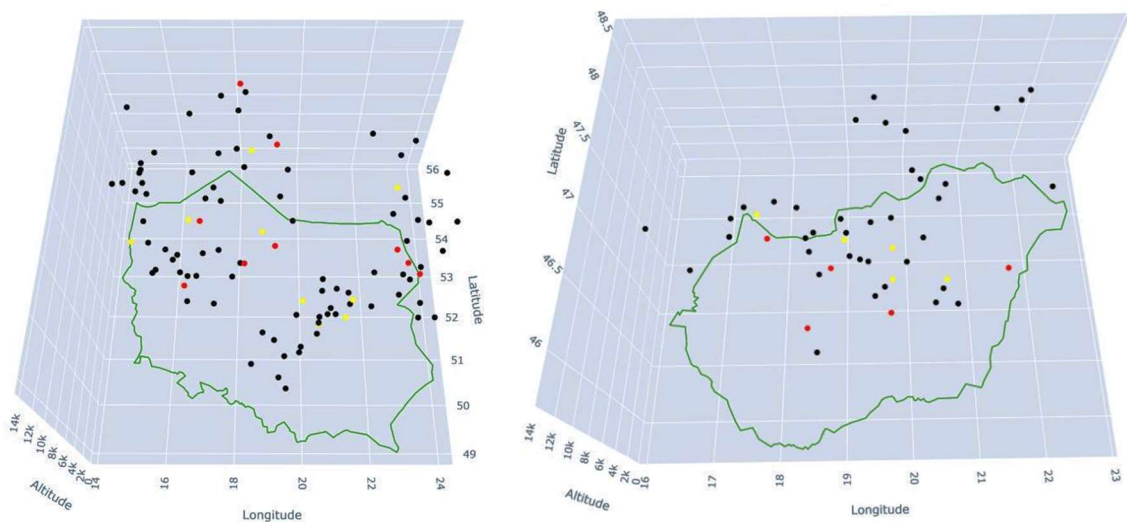
<b>GMM</b>	<b>BEL</b>	<b>CZE</b>	<b>FRA</b>	<b>GER</b>	<b>GRC</b>	<b>HUN</b>	<b>ITA</b>	<b>POL</b>	<b>PRT</b>	<b>ROM</b>	<b>Průměr</b>
<b>Průměrný počet letadel</b>	39,5	40,5	299,4	263,9	42,9	36	167	72,9	44,1	43,3	104,95
<b>Průměrná provozní hustota</b>	0,00128 7	0,00051 3	0,00054 2	0,00073 7	0,00032 5	0,00038 6	0,00055 4	0,00022 5	0,00047 8	0,00018 1	0,00052 3
<b>Průměrná RMSE (km)</b>	17,768	27,688	29,416	21,366	51,511	25,052	45,424	37,728	50,221	39,807	34,5981
<b>Korelační koeficient</b>	-0,4705	-0,4659	-0,7823	-0,2107	0,0524	-0,074	-0,4361	-0,5672	-0,4756	0,1176	-0,33123
<b>p hodnota</b>	0,1699	0,1747	0,0074	0,5588	0,8855	0,8387	0,2076	0,0872	0,1646	0,7462	0,38406
<b>HDBSCAN</b>	<b>BEL</b>	<b>CZE</b>	<b>FRA</b>	<b>GER</b>	<b>GRC</b>	<b>HUN</b>	<b>ITA</b>	<b>POL</b>	<b>PRT</b>	<b>ROM</b>	<b>Průměr</b>
<b>Průměrný počet letadel</b>	39,5	40,5	299,4	263,9	42,9	36	167	72,9	44,1	43,3	104,95
<b>Průměrná provozní hustota</b>	0,00128 7	0,00051 3	0,00054 2	0,00073 7	0,00032 5	0,00038 6	0,00055 4	0,00022 5	0,00047 8	0,00018 1	0,00052 3
<b>Průměrná RMSE (km)</b>	17,639	27,896	30,002	21,289	48,86	26,702	45,086	37,617	48,663	39,55	34,3304
<b>Korelační koeficient</b>	-0,4801	-0,4398	-0,7946	-0,2149	-0,0616	-0,4116	-0,4501	-0,5441	-0,4679	0,123	-0,37417
<b>p hodnota</b>	0,1601	0,2033	0,006	0,5509	0,8655	0,2372	0,1917	0,1039	0,1725	0,7348	0,32259
<b>K-means</b>	<b>BEL</b>	<b>CZE</b>	<b>FRA</b>	<b>GER</b>	<b>GRC</b>	<b>HUN</b>	<b>ITA</b>	<b>POL</b>	<b>PRT</b>	<b>ROM</b>	<b>Průměr</b>
<b>Průměrný počet letadel</b>	39,5	40,5	299,4	263,9	42,9	36	167	72,9	44,1	43,3	104,95
<b>Průměrná provozní hustota</b>	0,00128 7	0,00051 3	0,00054 2	0,00073 7	0,00032 5	0,00038 6	0,00055 4	0,00022 5	0,00047 8	0,00018 1	0,00052 3
<b>Průměrná RMSE (km)</b>	17,441	27,211	30,226	21,078	52,716	26,671	44,394	37,942	50,121	37,869	34,5669
<b>Korelační koeficient</b>	-0,4574	-0,5583	-0,8394	-0,2301	0,0711	-0,537	-0,415	-0,5936	-0,4703	0,2129	-0,38171
<b>p hodnota</b>	0,1837	0,0934	0,0023	0,5223	0,845	0,1087	0,2329	0,0703	0,1701	0,5546	0,27833

Tab. 2 Výsledné hodnoty pro modely

Průměrná střední kvadratická chyba (RMSE) vyšla u všech modelů mezi 34,3 a 34,6km. Jako nejpřesnější model se jeví model HDBSCAN, který využívá algoritmu HDBSCAN k vytvoření clusterů s hodnotou RMSE 34,3304km. Jako druhý pak vyšel model K-means s průměrnou hodnotou RMSE 34,5669km a jako poslední model GMM s průměrnou hodnotou RMSE 34,5981km. Jelikož hodnoty RMSE vyjadřují chybu v kilometrech, tak se mezi modely nenachází žádné výrazné rozdíly.

Pro všechny modely byl vypočítán korelační koeficient mezi chybou RMSE a dopravní hustotou, aby bylo ověřeno, zda existuje vztah mezi chybou RMSE a hustotou letového provozu pro danou zemi. Výsledné korelační koeficienty u všech modelů ukazují na slabou negativní korelaci. Tento výsledek naznačuje, že existuje určitá tendence ke stoupání chyby RMSE s klesající hustotou letového provozu. Je však důležité poznamenat, že u některých zemí byly zjištěny hodnoty relativně blízké -1, což může signalizovat složitější vzájemné vztahy. Z tohoto důvodu není možné jednoznačně určit přesný vliv hustoty letového provozu na chybu RMSE.

P-hodnoty v modelech se liší, s průměrnou hodnotou v rozmezí 0,27833 až 0,38406. Tato variabilita naznačuje, že existuje rozmanitost ve statistických výsledcích. Výsledky nejsou signifikantní na konvenčních hladinách významnosti, což může poukazovat na náhodné jevy nebo nepřítomnost statisticky významných vztahů mezi zkoumanými proměnnými.



Obr. 42 Vizualizace validačních dat

Na obrázku výše lze vidět letový provoz v Maďarsku a Polsku v červenci 2018. Černé body na obrázku představují letadla původně přítomná v daném vzdušném

prostoru. Červené body značí letadla, která byla odstraněna z provozu, a žluté body jsou body, které byly generovány za pomoci vytvořeného programu.

## 4 Výsledky

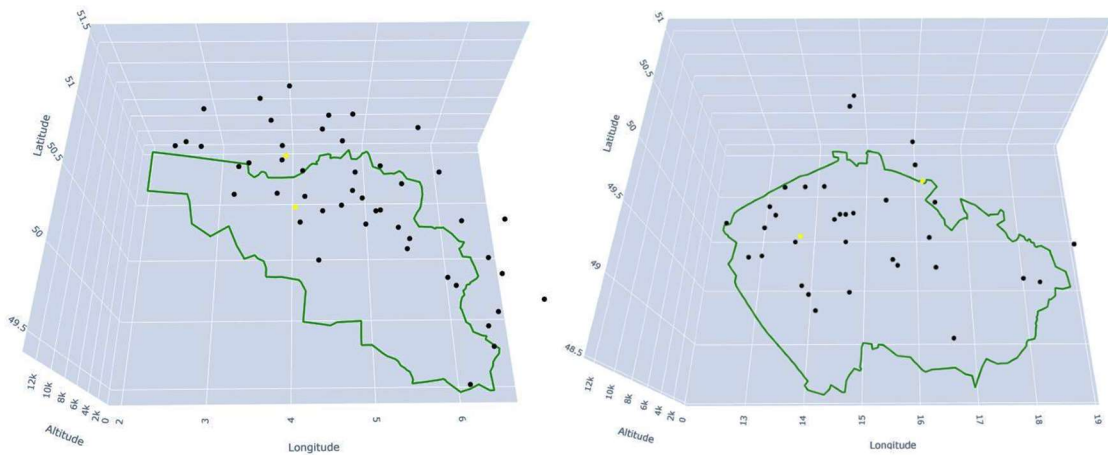
Poté co byl program vytvořen a také byla provedena validace daného programu, je možné přikročit k poslední fázi samotné diplomové práce a to je vytvoření výsledků. Výsledkem této práce je provedení navýšení letového provozu roku 2023 o předpovídané hodnoty navýšení.

Proces vytváření výsledků probíhal stejným způsobem jako vytváření dat pro validaci. Nejprve bylo nutné stažení určitých souborů dat ze specifických měsíců a dnů z roku 2023. Poté je však nutné samotné hodnoty, o které se má letový provoz navýšit, určit na základě předpovědí letového provozu na rok 2024 zveřejněné EUROCONTROLem [14].

Jak je možné vidět ve validaci, tak určité země měli v rámci všech modelů relativně přesné výsledky. Jedná se o země jako Německo, Francie nebo Belgie a Česká republika. U těchto zemí byly schopné modely generovat letový provoz s přesností 17 až 30km. Pokud tedy dojde ke generování nového letového provozu na základě předpovědi, tak by se samotná chyba v přesnosti od budoucího reálného provozu měla lišit v průměru právě o chyby RMSE vypočítané ve validaci.

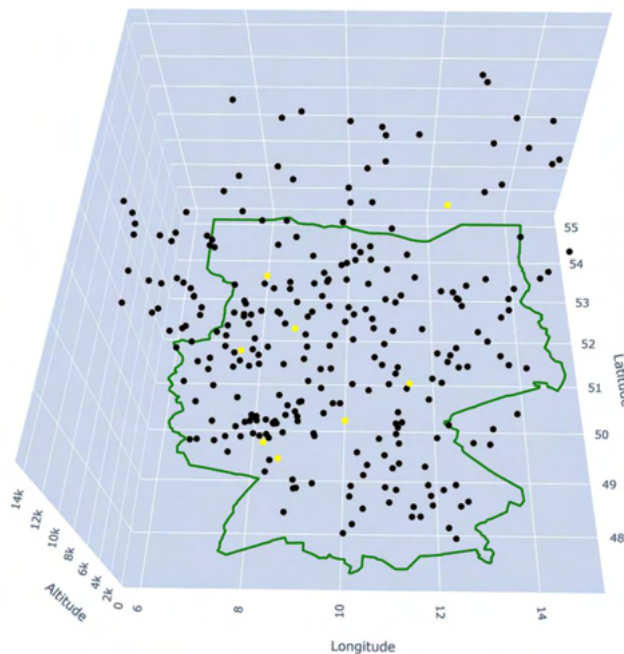
Výsledky byly zpracovány pro tři země, a to pro Českou republiku, Belgii a také Německo. Pro všechny země byly výsledky zpracovány ze stejného souboru dat. Data letového provozu v souboru dat byly získány z měsíce srpna. V srpnu byl pak vybrán dvacátý den v měsíci, což je neděle. Stejně jako u validace se jednalo o vzorek 2 sekund mezi 8:00:00 a 8:00:02 UTC.

Dle tříleté předpovědi vydané EUROCONTROLem dojde mezi rokem 2023 a rokem 2024 k nárůstu dopravy. U České republiky a Belgie dojde k nárůstu letecké dopravy o 4% a u Německa pak o 3 %. Výsledky tak byly zpracovány navýšením letového provozu z 20. srpna a zmíněná procenta.



Obr. 43 Vizualizace předpovědi pro Belgii a Českou republiku

Na prvním obrázku je možné vidět vizualizace výsledků u zemí Belgie a Česká republika. Jelikož nemají obě země velké množství letadel ve svém vzdušném prostoru, tak se u obou zemí jedná o navýšení o 2 letadla. Nová vygenerovaná letadla jsou pak na obrázku zvýrazněna žlutou barvou.



Obr. 44 Vizualizace předpovědi pro Německo

Jako druhý obrázek je pak vizualizace předpovídaného provozu pro Německo. U Německa bylo předpovězeno menší procento nárůstu, ovšem kvůli vyššímu počtu letadel v Německu se jedná o navýšení 8 letadel.

Samotná vizualizace neukazuje, jak bude vypadat provoz přesně 20. srpna v roce 2024. Ukazuje však jak vypadal provoz 20. srpna v roce 2023 s ukázkou v jakých

oblastech vzdušného prostoru, v rámci daného letového provozu, by se mohl nacházet nový letový provoz.

Je třeba brát v úvahu různé proměnné a také chybu RMSE při generování nových letadel. Pokud byla validací zjištěná chyba RMSE pro Německo přibližně 20km, lze předpokládat, že pokud by se provoz v roce 2024 nelišil, nový letový provoz by se nacházel v oblastech, které tento program předpovídá s přesností zhruba 20km pro každý vygenerovaný bod. Podobná logika platí i pro Belgii a Českou republiku, ale s odlišnými hodnotami RMSE pro tyto země.

## 5 Diskuse

Program, který vychází ze zadání diplomové práce byl vytvořen, ale samotná tvorba se neobešla bez mnohých chyb. Během psaní programu docházelo k chybám, a to především v práci s proměnnými. Jelikož se v rámci práce jednotky převádějí mezi jinými souřadnicovými systémy, někdy bylo velice obtížné rozluštit, jaké hodnoty se nacházejí v konkrétních proměnných a jak ovlivňují ostatní proměnné. Chyby také nastaly při zpracovávání clusterovací části programu, jelikož se jedná o nesložitější část programu, a hlavně část programu, kdy samotný počítat skrze algoritmus vytváří a rozděljuje data.

V rámci diskuze je nutné se také podívat na samotnou validaci diplomové práce, a především na výsledné hodnoty. Výsledné hodnoty RMSE byly u určitých států vyšší než u ostatních. V rámci zemí jako je Belgie, Česká republika, Francie nebo Maďarsko vyšly hodnoty RMSE okolo 20km. U dalších zemí jako například Itálie, Portugalsko nebo Řecko vycházely naopak hodnoty okolo 50km. Důvod proč u určitých zemí vycházejí hodnoty RMSE vyšší nebylo možné z provedených měření určit. Je možné že tyto země mají velice specifickou podobu letového provozu, která následně znemožňuje nebo ztěžuje přesnější generování letového provozu. Možnost, že by se hodnota RMSE zmenšila při mazání a generování nižších množství letového provozu je nepravděpodobná. Byl proveden pokus na zjištění změny hodnoty RMSE v závislosti na vymazané procentuální části letového provozu. Z tohoto pokusu vyplývá, že hodnota RMSE, se se stoupajícím procentuálním množstvím mazaného a generovaného letového provozu, výrazně nemění. Změna hodnoty RMSE se v průběhu mazání a generování od 10 % až 80 % změnila o nízké jednotky nebo dokonce desetinná čísla.

Jako další se pak jedná o korelační koeficienty mezi hodnotami RMSE a průměrnou hustotou letového provozu. Průměrné hodnoty skrze všechny země indikují slabou negativní korelaci. Pro jednotlivé země jsou hodnoty dosti různé, avšak neopouštějí mez slabé korelace. Některé země mají korelační koeficient blíže k nule než průměrná hodnota korelačního koeficientu. Francie je mezi všemi zeměmi v rámci korelačního koeficientu nejvíce odchýlená od nuly. Její hodnoty ve všech modelech indikují silnou negativní korelaci. Prvotně to bylo vysvětlováno velkým množstvím letadel, ale Německý korelační koeficient toto tvrzení vyvrací, jelikož mají země dosti podobný letový provoz, alespoň v rámci velikosti. Německý korelační koeficient s -0,21 spíše neindikuje žádnou korelaci než nějakou korelaci.

Program si také nese určité nevýhody, jako je například chybějící integrace stahování dat letového provozu přímo v programu. Pro stažení dat je nutno vždy využít externí program, který je schopný zpřístupnit databázi OpenSky Network a poskytnout funkci ke stažení dat.

S předchozí nevýhodou také přichází nevýhoda druhá, a to je nutnost manuální úpravy dat. Pokud byla předchozí nevýhoda opravena, byla by také v rámci programu nutné upravit stažená data a provést filtraci dat. Z časových důvodů byla filtrace dat prováděna v Microsoft Office Excel, který poskytoval na potřebnou filtraci dostatek rychlých a snadno ovladatelných filtrovacích funkcí. Tyto funkce by v případě integrace do programu musely být vloženy nebo vytvořeny v samotném programu. Z těchto důvodů byla filtrace a stahování dat prováděno skrze externí programy, které jsou k těmto činnostem vytvořeny.

Jako možná vylepšení programu je tedy možné brát právě tyto dvě předchozí nevýhody. Jejich integrování do samotného programu a odstranění manuálního stahování a filtrování dat, by velice urychlilo samotnou práci programu. Pokud by tyto části byly v rámci programu vytvářeny, bylo by také nutné vytvořit grafické uživatelské rozhraní, skrze které by bylo možné určit s jakými časovými rozpětími, dny a roky má program pracovat. Ve chvíli, kdy by tento program byl schopný fungovat skrze grafické uživatelské rozhraní, tak by jej také mohl používat každý.

Jako další možná modifikace programu by mohlo být jeho rozšíření na více regionů, a ne pouze na Evropský region. Jako nejlepší možnost v tomto ohledu je rozšíření programu na celý svět. Pokud by se prováděla daná modifikace, bylo by nutné daný program do určité míry přepsat, ale především by se jednalo o rozšíření knihovny zemí a jejich vzdušných prostorů.



## 6 Závěr

Diplomová práce se zabývala problematikou předpovědi letového provozu. Teoretická část práce poskytuje pohled na problematiku rozdělení a vytváření předpovědi letového provozu. V této části práce je také popsáno spojení předpovědi a mimořádných událostí jak regionálních, tak globálních. Část teoretické části je věnována samotnému clusterování a představení několika clusterovacích metod, které byly využity v diplomové práci. Důležitou součástí teoretické části je také pohled na problematiku sbírání letových dat. V dané kapitole jsou představeny a vysvětleny jednotlivé datové zdroje, ze kterých se následně skládají letová data na základě, kterých program funguje.

V praktické části je pak primárně popsána samotná tvorba programu. V této části jsou také uvedeny použité prostředky při tvorbě programu. Po této úvodní kapitole je pak uvedeno po jednotlivých krocích, jak byl program vytvářen a testován. Jedná se o části jako stahování dat, filtrace dat, jejich následné využití při vizualizaci prostorů a letového provozu. V praktické části je také popis tvorby clusterovacích částí programu a rozdíly mezi jednotlivými vytvořenými modely. Jako poslední byla v praktické části práce validace samotného programu a kvantifikace chybovosti při generování nového letového provozu.

Po validaci funkčnosti a přesnosti programu byla zpracována závěrečná část práce, která se skládala z výsledků. Ve výsledcích jsou zobrazeny tři vizualizace možného budoucího rozložení letového provozu nad třemi zeměmi. Tyto vizualizace byly zpracovány na základě historických dat letového provozu z roku 2023 a dat předpovědi letového provozu na rok 2024.

Problematika předpovídání letového provozu je velice důležitá část plynulosti letecké dopravy globálně. Vědět, jak moc se letový provoz v dané zemi zvýší a jakým způsobem by nově zvýšený letový provoz mohl vypadat, budou stále důležitější informace. S čím dál složitějšími algoritmy a výkonnějšími počítači bude možné vytvářet mnohem komplexnější programy, které budou schopné předpovídat letový provoz s nevídanou přesností a budou schopné vytvářet přesnější vizualizace budoucí distribuce letového provozu.

## 7 Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení metod [7].....	16
Obr. 2 Časová osa mimořádných událostí [8] .....	23
Obr. 3 Graf trendu letecké dopravy [8].....	24
Obr. 4 Procentuální růst letecké dopravy [10] .....	26
Obr. 5 Graf scénářů předpovědi [11].....	28
Obr. 6 Obrázek provozu na Evropou [12].....	29
Obr. 7 Procentuální změny provozu [13] .....	30
Obr. 8 Předpovědi se scénáři [14] .....	31
Obr. 9 Předpovědi se scénáři [15] .....	32
Obr. 10 Primární radar [21].....	34
Obr. 11 Sekundární radar [27] .....	36
Obr. 12 Schéma multilateračního systému [30].....	37
Obr. 13 Schéma ADS-B [20] .....	38
Obr. 14 Ukázka K-means clusterovacích iterací [36].....	40
Obr. 15 Ukázka rozdílu mezi K-means a HDBSCAN clustery [39] .....	41
Obr. 16 Ukázka clusterování na základě rozdělení [40].....	42
Obr. 17 Software Putty .....	44
Obr. 18 Příkazový řádek softwaru Putty.....	45
Obr. 19 Výstup dat z programu Putty a přenesení do excelu.....	45
Obr. 20 Vývojový diagram filtrace nečíselných hodnot .....	46
Obr. 21 Vývojový diagram kontroly bodů v polygonu.....	48
Obr. 22 První 2D vizualizace polygonu a bodů .....	49
Obr. 23 Ukázka více druhů prostorů .....	50
Obr. 24 Ukázka rozdělení vzdušného prostoru Německa .....	51
Obr. 25 Vývojový diagram výběru souřadnic vzdušných prostorů .....	52
Obr. 26 Vývojový diagram výběru souřadnic specifického prostoru .....	54

Obr. 27 Prvotní vizualizace vzdušného prostoru .....	55
Obr. 28 Vývojový diagram přiřazování letadel k prostorům.....	56
Obr. 29 Vizualizace prostoru s letadly.....	58
Obr. 30 Ukázka FIR a UIR prostorů v datech .....	60
Obr. 31 Ukázka sjednocení vzdušných prostorů Německa .....	61
Obr. 32 Vizualizace letadel a jejich výšek.....	62
Obr. 33 První 3D vizualizace dat .....	63
Obr. 34 3D vizualizace s reálnými výškami .....	64
Obr. 35 Clusterování s původními souřadnicemi .....	65
Obr. 36 ECEF vs Geodetické clusterování .....	66
Obr. 37 Graf výběru optimálního parametru Silhouette metody [58] .....	67
Obr. 38 Vizualizace za použití Silhouette metody .....	68
Obr. 39 Vizualizace generování bodů.....	69
Obr. 40 Ukázka mazání 40% bodů .....	69
Obr. 41 Zdrojový kód algoritmu na kontrolu rozstupů.....	70
Obr. 42 Vizualizace validačních dat .....	74
Obr. 43 Vizualizace předpovědi pro Belgii a Českou republiku .....	77
Obr. 44 Vizualizace předpovědi pro Německo .....	77

## 8 Seznam tabulek

Tab. 1 Data předpovědi [9] .....	25
Tab. 2 Výsledné hodnoty pro modely.....	73

## 9 Bibliografie

- [1] STANDFUSS, Thomas, Hartmut FRICKE a Matthias WHITTOME. Forecasting European Air Traffic Demand - How deviations in traffic affect ANS performance. *Transportation Research Procedia* [online]. 2021, **59**, 105-116 [cit. 2023-11-10]. ISSN 23521465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2021.11.102
- [2] CHEN, Dan, Minghua HU, Ke HAN, Honghai ZHANG a Jianan YIN. Short/medium-term prediction for the aviation emissions in the en route airspace considering the fluctuation in air traffic demand. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. 2016, **48**, 46-62 [cit. 2023-11-10]. ISSN 13619209. Dostupné z: doi:10.1016/j.trd.2016.08.003
- [3] *EUROCONTROL* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/forecasting>
- [4] *IATA* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.iata.org/en/services/consulting/airport-pax-security/traffic-forecasting/>
- [5] *Air Traffic Movement Outlook – Europe* [online]. 2021 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-traffic-movement-outlook---europe---august-2021/>
- [6] *20 Year Passenger Forecast* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.iata.org/en/publications/store/20-year-passenger-forecast/>
- [7] *Developing a Long Term Air Traffic Demand Forecast Model* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://www.icao.int/sustainability/Documents/RTK%20ranking/ICAO\\_LTF\\_MODEL\\_DOC.pdf](https://www.icao.int/sustainability/Documents/RTK%20ranking/ICAO_LTF_MODEL_DOC.pdf)
- [8] *FAA aerospace forecast* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/2000-2011/media/tabI-2.pdf](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/2000-2011/media/tabI-2.pdf)
- [9] *ICAO Facts and Figures* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://www.icao.int/sustainability/pages/facts-figures\\_worldeconomydata.aspx](https://www.icao.int/sustainability/pages/facts-figures_worldeconomydata.aspx)
- [10] *EUROCONTROL Five-Year Forecast 2020-2024* [online]. 2020 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-11/eurocontrol-five-year-forecast-europe-2020-2024.pdf>

- [11] *ICAO - Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation* [online]. 2023 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://www.icao.int/sustainability/Documents/Covid-19/ICAO\\_coronavirus\\_Econ\\_Impact.pdf](https://www.icao.int/sustainability/Documents/Covid-19/ICAO_coronavirus_Econ_Impact.pdf)
- [12] *FlightRadar24* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.flightradar24.com/>
- [13] GIACHETTI, Mariia. *The possibility of future crisis in passenger air transportation industry in Eastern Europe due to the Russian invasion in Ukraine in 2022*. Jyväskylä, 2022. Bakalářská práce. JAMK University of Applied Sciences.
- [14] *EUROCONTROL Forecast Update 2022-2024* [online]. 2022 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2022-06/eurocontrol-three-year-forecast-2022-2024-june-2022.pdf>
- [15] *EUROCONTROL Forecast Update 2021-2027* [online]. 2021 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-10/eurocontrol-7-year-forecast-2021-2027.pdf>
- [16] *FAA AEROSPACE FORECAST* [online]. 2022 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/FY2022\\_42\\_FAA\\_Aerospace\\_Forecast.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-06/FY2022_42_FAA_Aerospace_Forecast.pdf)
- [17] *AIRBUS Global Services Forecast* [online]. 2022 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://aircraft.airbus.com/sites/g/files/jlcbta126/files/2022-10/Airbus%20Global%20Services%20Forecast%202022-2041%20\\_%20Press%20briefing%20-%20Web%20version.pdf](https://aircraft.airbus.com/sites/g/files/jlcbta126/files/2022-10/Airbus%20Global%20Services%20Forecast%202022-2041%20_%20Press%20briefing%20-%20Web%20version.pdf)
- [18] S. NOLAN, Michael. *Fundamentals of Air Traffic Control*. 2003. Brooks Cole, 2003. ISBN 0534393888.
- [19] *Daily Traffic Variation - States* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/Economics/DailyTrafficVariation-States.html>
- [20] *Air traffic management - a guide to global surveillance* [online]. 2014 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ADSBIMP/ADSBIMPP12.pdf>
- [21] *Primary surveillance radar Morava 10* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.nrtscz.cz/radar-psr-morava-10/>
- [22] *Surveillance Systems* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/air\\_traffic/publications/atpubs/aim\\_html/chap4\\_section\\_5.html](https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap4_section_5.html)

- [23] STEVENS, Michael C. *Secondary surveillance radar*. 1988. Boston: Artech House, 1988. ISBN 978-0-89006-292-0.
- [24] KOSE, Mehmet Cagri. *Mode A/C, Mode S and ADS-B, The Alphabet Soup of Secondary Surveillance* [online]. 2019 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://medium.com/@mehmetcagrikose/mode-a-c-mode-s-and-ads-b-the-alphabet-soup-of-secondary-surveillance-1defcd35b2ab>
- [25] WOLFF, Christian. *Radartutorial* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.radartutorial.eu/13.ssr/sr09.en.html>. Publisher: Dipl.-Ing. (FH) Christian Wolff
- [26] BODART, Jérôme. *Mode S Surveillance Principle* [online]. 2019 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.icao.int/MID/Documents/2019/MICA/MICA-MID%20-%20WP%2002%20-%20Mode%20S%20Surveillance%20Principle.pdf>
- [27] *Secondary surveillance radar* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary\\_surveillance\\_radar](https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_surveillance_radar)
- [28] *Multilateration - an overview - pdf* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/multilateration/pdf>
- [29] TRAVIS, Mick. *A demonstration of TDOA multilateration* [online]. 2022 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://lo.calho.st/posts/tdoa-multilateration/>
- [30] *Hyperboloids* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/TDoA-MULTILATERATION-THE-INTERSECTION-OF-HYPERBOLOIDS-1-3-CALCULATED-FROM-THE-FOUR\\_fig3\\_305719081](https://www.researchgate.net/figure/TDoA-MULTILATERATION-THE-INTERSECTION-OF-HYPERBOLOIDS-1-3-CALCULATED-FROM-THE-FOUR_fig3_305719081)
- [31] SUN, Junzi, Huy VU, Joost ELLERBROEK a Jacco M. HOEKSTRA. PyModeS: Decoding Mode-S Surveillance Data for Open Air Transportation Research. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* [online]. 2020, **21**(7), 2777-2786 [cit. 2023-11-11]. ISSN 1524-9050. Dostupné z: doi:10.1109/TITS.2019.2914770
- [32] BARTOŇ, Tomáš. *Meta-optimizations for Cluster Analysis*. Prague, 2019. Disertační práce. ČVUT v Praze.
- [33] SWARNDEEP, Saket J a Pandya DR. SHARNIL. An Overview of Partitioning Algorithms in Clustering Techniques. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*. 2016, **2016**(6), 4. ISSN 2278 – 1323.
- [34] *What is Clustering in Machine Learning: Types and Methods* [online]. 2022 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.analytixlabs.co.in/blog/types-of-clustering-algorithms/>

- [35] MCGREGOR, Milecia. *Clustering Algorithms in Machine Learning that All Data Scientists Should Know* [online]. 2020 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.freecodecamp.org/news/8-clustering-algorithms-in-machine-learning-that-all-data-scientists-should-know/>
- [36] PIECH, Chris. *K Means* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://stanford.edu/~cpiech/cs221/handouts/kmeans.html>
- [37] BHATTACHARJEE, Panthadeep a Pinaki MITRA. A survey of density based clustering algorithms. *Frontiers of Computer Science* [online]. 2021, **15**(1) [cit. 2023-11-11]. ISSN 2095-2228. Dostupné z: doi:10.1007/s11704-019-9059-3
- [38] *Sklearn.cluster.HDBSCAN* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.HDBSCAN.html>
- [39] BERBA, Pepe. *Understanding HDBSCAN and Density-Based Clustering* [online]. 2020 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://pberba.github.io/stats/2020/01/17/hdbscan/>
- [40] *Clustering Algorithms* [online]. 2022 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://developers.google.com/machine-learning/clustering/clustering-algorithms>
- [41] *Clustering in Machine Learning* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.javatpoint.com/clustering-in-machine-learning>
- [42] *OpenSky Network* [online]. b. r. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://opensky-network.org/>
- [43] *Putty* [online]. b. r. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://www.putty.org/>
- [44] *Pandas* [online]. b. r. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://pandas.pydata.org/>
- [45] *Python math.isnan() Method* [online]. b. r. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: [https://www.w3schools.com/python/ref\\_math\\_isnan.asp](https://www.w3schools.com/python/ref_math_isnan.asp)
- [46] *Matplotlib* [online]. 2012 [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://matplotlib.org/>
- [47] *Google Maps* [online]. b. r. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://www.google.com/maps>
- [48] *Aviation Data for Research* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/dashboard/rnd-data-archive>



- [49] *Current FIR Status* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.icao.int/safety/fits/lists/current%20fir%20status/eurnat.aspx#InplviewHashd2975361-8198-4c00-9646-775c3f312521=>
- [50] *List of flight information regions* [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Flight\\_information\\_region](https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_information_region)
- [51] *For loops* [online]. b. r. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://wiki.python.org/moin/ForLoop>
- [52] *The Shapely User Manual* [online]. b. r. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://shapely.readthedocs.io/en/stable/manual.html>
- [53] *ISO search* [online]. b. r. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#search>
- [54] *Plotly* [online]. 2013 [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://plotly.com/>
- [55] *Pymap3d* [online]. b. r. [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://geospace-code.github.io/pymap3d/>
- [56] <https://www.geeksforgeeks.org/silhouette-algorithm-to-determine-the-optimal-value-of-k/> [online]. b. r. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/silhouette-algorithm-to-determine-the-optimal-value-of-k/>
- [57] SHAHAPURE, Ketan Rajshekhar a Charles NICHOLAS. Cluster Quality Analysis Using Silhouette Score. In: *2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)* [online]. IEEE, 2020, s. 747-748 [cit. 2023-11-11]. ISBN 978-1-7281-8206-3. Dostupné z: doi:10.1109/DSAA49011.2020.00096
- [58] *Selecting optimal number of clusters in KMeans Algorithm (Silhouette Score)* [online]. 2019 [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://jyotiyadav99111.medium.com/selecting-optimal-number-of-clusters-in-kmeans-algorithm-silhouette-score-c0d9ebb11308>
- [59] *Air Traffic Management - ICAO doc. 4444* [online]. 2017 [cit. 2023-11-17]. Dostupné z: <https://skyrise.aero/wp-content/uploads/2017/03/ICAO-Doc-4444-EN.pdf>