



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÁ**

Dávid Luteran

Vplyv sopečnej činnosti na letovú prevádzku v ČR

Bakalárska práca

**ROK ODOVZDANIA BAKALARSKEJ PRÁCE: 2022**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
Fakulta dopravní  
děkan  
Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K621.....Ústav letecké dopravy**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Dávid Luteran**

Studijní program (obor/specializace) studenta:

**bakalářský –PIL– Profesionální pilot**

Název tématu (česky): **Vliv sopečné činnosti na letecký provoz v ČR**

Název tématu (anglicky): **Effect of Volcanic Activity to Air Traffic in ČR**

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je analyzovat strategii opatření civilního letectví v ČR v souvislosti se sopečnou činností a stanovit hodnotící kritéria ohrožení, při kterých bude navržen postup pro optimální opatření civilního letectví v ČR.
- Popište vliv sopečné činnosti na letový provoz.
- Zjistěte možnosti detekce či sledování sopečné činnosti.
- Analyzujte současný legislativní rámec v případě ohrožení sopečnou činností v ČR.
- Stanovte parametry, při kterých vulkanická činnost může ohrozit leteckou dopravu v ČR.
- Diskutujte výsledky šetření a navrhňte optimální opatření civilního letectví v ČR.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

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

Seznam odborné literatury: CommercialAviationSafety 4th Edition, McGraw – HillCompanies ISBN-10: 0071417427  
EUR Doc 019, VolcanicAshContingencyPlan EUR and NAT regions, ICAO  
Letecký předpis L4444, Postupy pro letové navigační služby, Uspořádání letového provozu, MD ČR

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Iveta Kameníková**

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **8. srpna 2022**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



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

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

  
Dávid Luteran  
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 8. října 2021

# Pod'akovanie

Touto formou by som sa chcel poďakovať mojej vedúcej práce páni **Mgr. Ivete Kameníkovej** za cenné poznatky, rady a pripomienky, ktorými mi bola nápomocná pri tvorbe tejto práce. Taktiež by som sa chcel poďakovať mojej rodine za podporu počas môjho pôsobenia na tejto škole.

## **Prehlásenie**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu spracoval samostatne a uviedol všetku použitú literatúru a odborné zdroje v súlade s metodickým pokynom o etickej príprave vysokoškolských záverečných prác.

V Prahe dňa 8.8.2022

## **Abstrakt**

Cieľom tejto bakalárskej práce je určiť parametre, pri ktorých by mohlo dôjsť k ohrozeniu českého vzdušného priestoru. V práci boli priblížené vplyvy sopečného popola na letectvo a možnosti detekcie sopečnej aktivity. Na základe analýzy dostupných dát boli rozobraté jednotlivé incidenty, v rámci ktorých boli určené parametre, ktoré by mohli predstavovať ohrozenie vzdušného priestoru Českej republiky.

## **Kľúčové slova**

Sopečný popol, Sopečná erupcia, Detekcia, Sopka, Radar, Satelit, Incident, VEI, Česká republika

## **Abstract**

The aim of this bachelor thesis is to determine parameters which could endanger the Czech airspace. The thesis deals with the effects of volcanic ash on aviation and the ways of detection of volcanic eruption. Based on the analysis of the available data, particular incidents were analysed, within which parameters that could pose a threat to the Czech airspace were presented.

## **Key words**

Volcanic ash, Volcanic eruption, Detection, Volcano, Radar, Satellite, Incident VEI, Czech republic

# Obsah

Úvod .....	1
<b>1. Vplyv sopečného popola .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Vplyv sopečného popola na prúdové motory.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Vplyv sopečného popola na letiská a pozemné zariadenia .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Detekcia sopečnej aktivity.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Vizúálne pozorovanie.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Detekcia prostredníctvom pozemných radarov .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Vesmírna detekcia .....</b>	<b>10</b>
<b>3. Incidenty spojené so sopečným popolom .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Let British Airways 009 .....</b>	<b>16</b>
<b>4. Postupy spojené s kontamináciou vzdušného priestoru ČR sopečným popolom</b>	<b>17</b>
<b>4.1 SIGMET .....</b>	<b>18</b>
<b>4.2 Orgány sledujúce sopečnú činnosť .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2.1 Medzinárodná služba pre sledovanie sopečného popola (IAVW) .....</b>	<b>20</b>
<b>4.2.2 Meteorologická výstražná služba (MWO) .....</b>	<b>22</b>
<b>4.2.3 Poradné strediská o oblakoch sopečného popola ( VAAC) .....</b>	<b>23</b>
<b>5.1 Index sopečnej aktivity ( VEI) .....</b>	<b>26</b>
<b>5.2 Závažnosť incidentov.....</b>	<b>28</b>
<b>5.3 Analýza incidentov od roku 2010.....</b>	<b>31</b>
<b>5.4 Počítačová simulácia sopečnej erupcie.....</b>	<b>34</b>
<b>5.4.1 Vplyv vetra na prenos sopečných častíc .....</b>	<b>35</b>
Záver .....	39
Citácie .....	40



## **Zoznam skratiek**

<b>ATC</b>	Air traffic control Riadenia letovej prevádzky
<b>VHF</b>	Very high frequency Veľmi vysoká frekvencia
<b>UHF</b>	Ultra high frequency Ultra vysoká frekvencia
<b>UTC</b>	Co-ordinated Universal Time Svetový koordinovaný čas
<b>IMO</b>	Icelandic meteorological office Islandský meteorologický úrad
<b>AVHRR</b>	Advanced Very High Resolution Radiometer
<b>TOMS</b>	Total ozone mapping sensor
<b>IFR</b>	Instrument Flight Rules Let podľa prístrojov
<b>IVATF</b>	International Volcanic Ash Task Force
<b>IATA</b>	The international Air Transport Association Medzinárodná asociácia pre leteckú dopravu
<b>VAAC</b>	Volcanic Ash Advisory Center Poradné strediská o oblakoch sopečného popola
<b>MWO</b>	Meteorological Watch Office Meteorologická výstražná služba
<b>IAVW</b>	International Airways Volcano Watch Medzinárodná služba pre sledovanie sopečného popola

<b>FL</b>	Flight level Letová hladina
<b>ČHMU</b>	Český hydrometeorologický úrad
<b>OLM</b>	Odbor leteckej meteorológie
<b>FIR</b>	Flight information region Letová informačná oblasť
<b>VA</b>	Volcanic ash Sopečný popol
<b>ČR</b>	Česká republika
<b>VAWSG</b>	International Airways Volcano Watch Operation Group
<b>ACC</b>	Area Control Center Oblasťná služba riadenia
<b>VEI</b>	Volcanic explosivity index Index sopečnej aktivity
<b>ICAO</b>	International Civil Aviation Organization Medzinárodná organizácia civilného letectva
<b>FT</b>	Fett Stopa

## Zoznam obrázkov

Obr. 1 : Detekovaný sopečný popol prostredníctvom MODIS senzoru. [2] .....	2
Obr. 2 : Usadený sopečný popol na jednom z motorov letu BA09 [5].....	5
Obr. 3 Usadený sopečný popol na lietadle DC-10 počas sopečnej erupcie v roku 1991 [7].....	6
Obr. 4 Radarové snímky počas sopečnej erupcie v Keflavíku medzi 22 Májom 2011 03:00 UTC a 22 Májom 21:00 UTC [16] .....	10
Obr. 5 Porovnanie satelitných snímok zachytené pomocou AVHRR a TOMS [17] ....	12
Obr. 6 Poloha sopečného mraku medzi 14-15. aprílom [21].....	13
Obr. 7 Koncentrácia sopečného popola v jednotlivých oblastiach do letovej hladiny FL200 [21] .....	15
Obr. 8 Príklad SIGMETU [28] .....	19
Obr. 9 Orgány Medzinárodnej služby pre sledovanie sopečného popola (IAVW) [30]	21
Obr. 10 Regulačné ustanovenia medzinárodnej služby pre sledovanie sopečného popola (IAVW) [30] .....	22
Obr. 11 Rozmiestnenie VAAC a ich príslušné oblasti [30].....	24
Obr. 12 Počty incidentov v závislosti na sile erupcie medzi rokmi 1953 až 2022 .....	27
Obr. 13 Počty incidentov v závislosti na triede závažnosti medzi rokmi 1953 až 2009	31
Obr. 14 Počet incidentov v jednotlivých rokoch .....	31
Obr. 15 Incidenty v závislosti na letovej hladine.....	33
Obr. 16 Polohy stretu lietadla so sopečným popolom v prvý deň simulácie ( vľavo) a druhý deň (vpravo) [36].....	34
Obr. 17 Charakteristika vetra počas sopečnej erupcie Eyjafjallajökull [37] .....	36
Obr. 18 Simulovaný pohyb sopečného mraku nad Európou 17.4.2010 [37].....	36

## Zoznam tabuliek

Tab. 1 : Frekvenčné pásma radarov [12] .....	8
Tab. 2 : Charakteristika AVHHR pásiem [20] .....	11
Tab. 3 : Nebezpečné meteorologické javy publikované v SIGMETE a ich skratky [29] .....	18
Tab. 4 : Poloha sopiek, ktoré predstavujú potencionálne ohrozenie pre ČR.[31] .....	25
Tab. 5 : Parametre a frekvencie jednotlivých stupňov sopečných erupcií [33] .....	26
Tab. 6 : Index závažnosti incidentov [35].....	28
Tab. 7 : Incidenty s indexom triedy 4 [35] .....	30
Tab. 8 : Vzďialenosti stretu lietadla od zdroja sopečnej erupcie medzi rokom 2010 až 2014 [36].....	32
Tab. 9 : Počty incidentov v závislosti na type lietadla a triedy závažnosti.....	33
Tab. 10 : Počet simulovaných incidentov v daný deň [36].....	34
Tab. 11 : Počet simulovaných incidentov počas danej fáze letu [36].....	35
Tab. 12 : Vplyv rýchlosti vetra na množstvo preneseného popola [37] .....	35

# Úvod

Sopečná činnosť je v súčasnej dobe veľmi diskutovanou témou. Za posledných 10 rokov došlo k niekoľkonásobnému nárastu sopečnej aktivity v porovnaní s minulosťou. V roku 2010 došlo k výbuchu sopky Eyjafjallajökull na Islande, ktorý spôsobil najväčšie narušenie letovej prevádzky v Európe od 2. svetovej vojny. Zrušených bolo viac ako sto tisíc letov naprieč celou Európou, čo sa dotklo viac ako milióna ľudí.

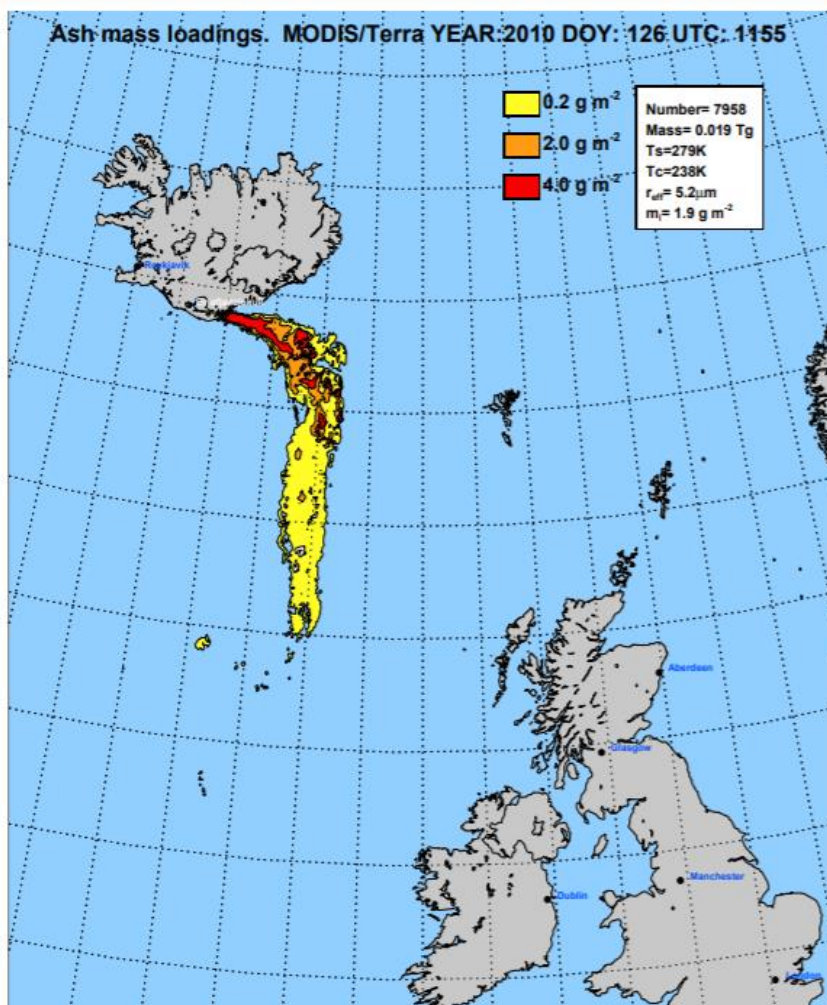
Popol vyvrhnutý počas sopečnej erupcie je pre leteckú dopravu veľmi nebezpečný, pretože sa dokáže ľahko šíriť v atmosfére. Množstvo popola, ktorý sa nachádza v atmosfére, sa znižuje od vzdialenosti sopečnej erupcie. Nebezpečenstvo spojené so stretom lietadla a sopečného popola sa zvyšuje od koncentrácie sopečných častíc v atmosfére, rýchlosti letu a doby, po ktorej lietadlo letí v kontaminovanom vzdušnom priestore.

Extrémne silné vulkanické erupcie, ktoré nastávajú raz za rádovo stoviek až desaťtisíce rokov môžu mať až globálne následky, pri ktorých je množstvo vyvrhnutého popola do atmosféry extrémne a dochádza k obmedzeniu množstva slnečného žiarenia prechádzajúceho atmosférou, čo môže mať za následok dočasnú zmenu klímy na planéte.

Sopky majú obrovský vplyv na globálnu klímu a jej premenlivosť, keďže prachové a plynné častice, ktoré pri svojej regulárnej činnosti vyvrhujú do atmosféry môžu mať vplyv na vlastnosti atmosféry Zeme. Závažnosť vplyvu sopečnej aktivity na zemskú klímu závisí okrem sily sopečného výbuchu a geografickej polohy sopky, tiež na množstve a chemickom zložení vyvrhnutých častíc, či na ich vertikálnom rozprestretí a koncentrácii v každej vrstve atmosféry.

# 1. Vplyv sopečného popola

Sopečný popol, ktorý má vplyv na prevádzku dopravných lietadiel predstavuje iba veľmi malú časť celkovej hmotnosti vyvrhnutého materiálu počas sopečnej erupcie, zvyčajne pár percent, a to z dôvodu, že väčšina častíc dopadne počas erupcie na zem. Častice, ktoré sa pohybujú v atmosfére sa dokážu šíriť veľkými vzdialenosťami a ich priemer je zvyčajne okolo 1 až 30  $\mu\text{m}$ . Tieto častice sa dokážu udržať v atmosfére až niekoľko mesiacov, ale ich zotrvanie vo vzduchu závisí od veľkosti sopečného stĺpca počas sopečnej erupcie a od atmosférických procesov, ako je napríklad dážď, a vertikálnych pohybov vzduchových hmôt v atmosfére. Doba zotrvania častíc v atmosfére taktiež závisí od ich tvaru. Menej aerodynamické tvary sopečných častíc majú vyšší odpor a je vysoko nepravdepodobné, aby sopečné častice s priemerom väčším ako 30  $\mu\text{m}$  sa dokázali udržať v atmosfére niekoľko hodín a prejsť vzdialenosť niekoľko stoviek kilometrov. [1]



Obr. 1 : Detegovaný sopečný popol prostredníctvom MODIS senzoru. [2]

Na obrázku č.1 je znázornený sopečný popol spolu s inými materiálmi. Po kontakte s atmosférou sopečné častice veľmi rýchlo zmrznú a ich povrch je podobný sklovitému materiálu. Sopečný popol obsahuje minerály akými sú kremeň, živec, olivín a podobne. Sklenené častice sú veľmi krehké a pri teplote medzi 700 až 1100 °C ( teplota tavenia závisí od proporcie minerálov) [1] sa začnú taviť a tým sa stanú lepkavými, čo môže ohroziť prevádzku prúdového motora pri ich nasiaknutí. Teploty v najteplejších častiach prúdového motora dosahujú až 1500 °C, čo môže spôsobiť roztavenie sopečných častíc spolu s ostatnými minerálmi.

Horúci lepkavý materiál môže upchať otvory pre prívod a odvod vzduchu a prilepiť sa na kovové povrchy. Pri nižších prevádzkových teplotách motora alebo ak je motor úplne vypnutý dochádza k zmene skupenstva sklovitého materiálu, čo môže viesť k jeho popraskaniu, a tým aj jeho opadnutiu z kovových plôch.

## **1.1 Vplyv sopečného popola na prúdové motory**

V dnešnej dobe sú dôsledky sopečného popola na prúdové motory podrobne známe, a to buď z demontážnych kontrol motora lietadla, ktoré počas letu preletelo sopečným popolom alebo z pozemných testov, počas ktorých bol sopečný popol zámerne nasiaknutý motorom. V zásade sú známe 3 príčiny, ktoré môžu viesť k poškodeniu motora. Prvou najkritickejšou príčinou je nižšia teplota tavenia popola ako je prevádzková teplota motora na voľnobehu. Sopečný popol je prevažne tvorený kremičitanmi, ktoré majú teplotu tavenia okolo 1100°C, pričom prevádzkové teploty prúdového motora dosahujú až 1400°C. To ma za následok tavenie popola v horúcich častiach motora a dochádza k jeho usadeniu na lopatkách motora. Usadenie popola na lopatkách motora znižuje prierez hrdla vo vysokotlakovej časti turbíny, čím dochádza k zvýšeniu statického tlaku, čo môže viesť k zníženiu ťahu motora alebo až zlyhaniu pohonnej jednotky [3]. Staršie generácie prúdových motorov mali nižšie prevádzkové teploty, a tým boli pravdepodobne menej náchylné k tomuto efektu.

V dnešnej dobe je cieľom zvyšovať prevádzkové teploty prúdových motorov, a to z dôvodu zvyšovania výkonu a znižovania spotreby paliva. Tento trend zvyšovania prevádzkových teplôt predstavuje zvýšené riziko usadenia sopečného popola na lopatkách motora, a tým predstavuje nebezpečenstvo pre leteckú dopravu v budúcnosti.

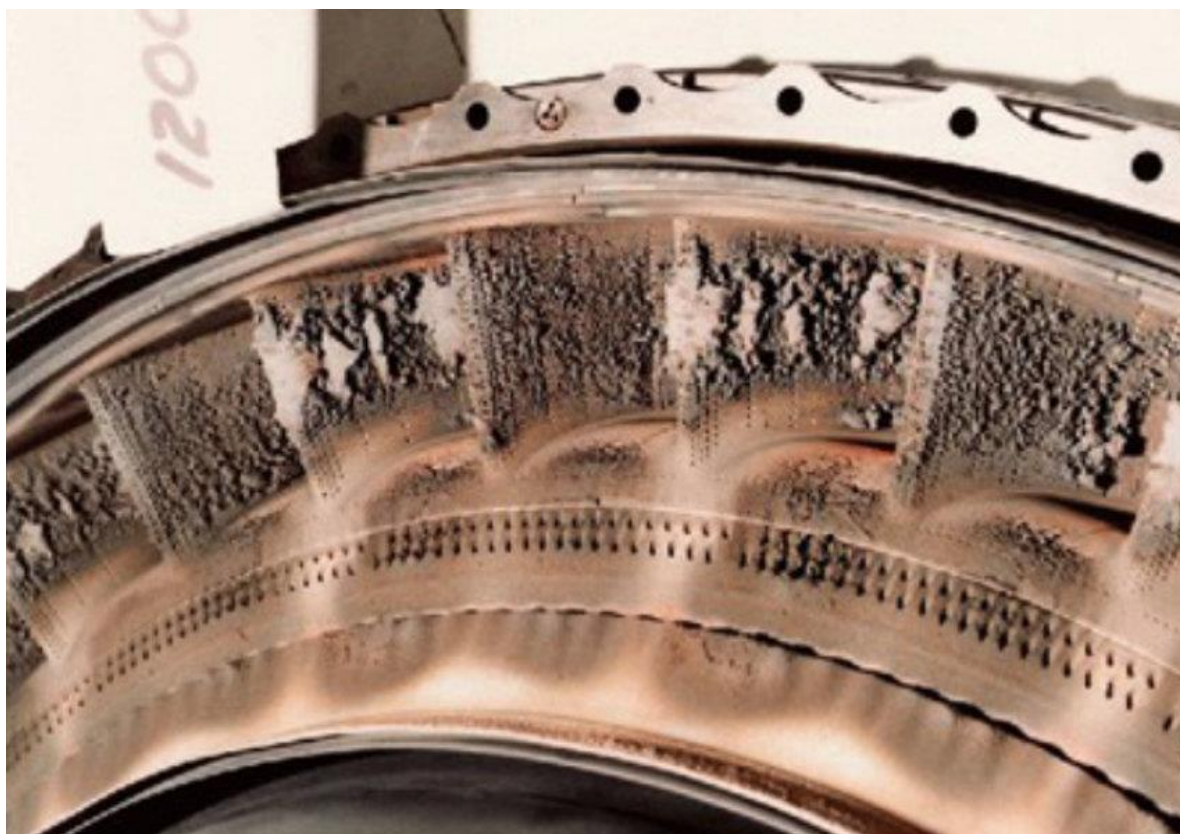
Počas pozemných kontrol poškodených motorov bolo zistené, že usadeniny popola na lopatkách turbíny sú pri izbovej teplote veľmi krehké a dochádza k ich opadnutiu.[4] K totožnému efektu dochádza aj počas letu, kedy sa posádka pokúša opätovne poškodený motor naštartovať. Štartovanie motora a následné nastavenie výkonu na voľnobeh má za následok náhle zmeny teplôt a tlaku v častiach motora, čo vedie k oddeleniu týchto usadenín.

Z dôvodu, že sopečný popol je veľmi drsný dochádza k erózií hrán lopatiek na kompresore, čo zapríčiňuje zníženie efektivity vysoko tlakovej turbíny a redukciu ťahu. Hlavnými faktormi, ktoré majú za následok eróziu lopatiek na kompresore sú tvrdosť, veľkosť a koncentrácia sopečných častíc, rýchlosť častíc pri náraze a nastavenie výkonu motora. Poškodené časti spôsobené eróziou sú trvalé a je potrebná ich výmena.

Ďalšou príčinou, ktorá môže viesť k zlyhaniu pohonnej jednotky je upchatie otvorov vedúcich k palivovým a chladiacim systémom. Upchatie týchto systémov môže viesť k náročnému alebo až nemožnému pokusu o opätovné nahodenie poškodeného motora. Blokácia palivových a chladiacich systémom počas preletu sopečným popolom je hrozba, avšak dodnes nebol hlásený ani jeden incident s danou problematikou.

Počas preletu sopečným popolom môže dôjsť k usadeniu popola na trupe lietadla, ako aj na prístrojoch v kabíne lietadla, a zároveň môže dôjsť k znečisteniu batožinových priestorov. Elektrické systémy, u ktorých došlo ku kontaminácii sopečným popolom je potrebné vymeniť, z dôvodu že mohlo dôjsť k ich prehriatiu. Prítomnosť sopečných častíc v kabíne lietadla môže mať za následok aktiváciu požiarneho indikátorov na palube. Lietadla. [4]





Obr. 2 : Usadený sopečný popol na jednom z motorov letu BA09 [5]

## 1.2 Vplyv sopečného popola na letiská a pozemné zariadenia

Sopečný popol pri dopade na plochu letiska zanecháva súvislú vrstvu na pristávacích dráhach, pojazdových dráhach a na ostatných plochách, čo môže viesť k uzatvoreniu kontaminovaných plôch z dôvodu bezpečnosti. Znečistené plochy znižujú trakciu pre lietadlá, ktoré sa pohybujú na letiskových plochách, čo má za následok predĺženie brzdných dráh. Nebezpečenstvo môže predstavovať aj klesajúca dohľadnosť, keďže sopečný popol usadený na povrchu je rozfúkavaný prúdovými motormi do ovzdušia. Súvislá vrstva popola už vo výške 1 mm môže mať za následok uzatvorenie plôch na letisku z dôvodu bezpečnosti.[6]

Pre elektrické zariadenia nachádzajúce sa na letisku predstavuje sopečný popol veľkú hrozbu. Sopečný popol sa vie veľmi ľahko dostať cez úzke medzery, a tým poškodiť vnútorné komponenty elektrických zariadení. Rôzne chladiace systémy a filtre sa po kontaminácii často stávajú nepoužiteľnými, pretože je ich nemožné vyčistiť a je potrebná

ich výmena. Ďalším nebezpečenstvom pre elektrické systémy predstavuje fakt, že sopečný popol po zmiešaní s vodou sa stáva veľmi vodivým, čo môže spôsobiť skrat v elektrických obvodoch a následný požiar. Sopečný popol je schopný na seba naviazať veľké množstvo vody a jeho hustota dosahuje hodnoty až 1400 kg/m<sup>3</sup>[6]. To predstavuje veľkú hrozbu pre budovy na letisku. Pri dopade mokrého popola na strechy budov môže dôjsť k ich poškodeniu alebo až zrúteniu. Táto konzistencia je nebezpečná aj pre samotné lietadlá. Vysoká hustota popola môže zapríčiniť zmenu ťažiska stojaceho lietadla, a tým viesť aj k jeho prevráteniu.



Obr. 3 : Usadený sopečný popol na lietadle DC-10 počas sopečnej erupcie v roku 1991 [7]

Medzi rokmi 1944 až 2006 bolo evidovaných 101 letísk z 28 krajín, pri ktorých došlo k narušeniu prevádzky z dôvodu sopečnej erupcie. Najväčšie riziko pre letiská počas sopečnej erupcie predstavuje pád sopečných častíc na prevádzkové plochy. Najväčšie znečistenie bolo zdokumentované v roku 1991 na letisku Rabaul v štáte Nová Guinea, kedy vrstva sopečného popola dosahovala až 50 cm. [8]

## 2. Detekcia sopečnej aktivity

Počas sopečnej erupcie dochádza k vyvrhnutiu plynu do atmosféry, ktorý je prevažne zložený z vody, oxidu uhličitého, oxidu siričitého, kyseliny chlorovodíkovej a pevných častíc, ktorých priemer sa pohybuje v rozmedzí niekoľkých nanometrov až do niekoľkých centimetrov. Zo štúdie Stevenson et al. [9] vyplýva, že častice s priemerom v rozmedzí 20 až 125  $\mu\text{m}$  sa dokážu šíriť atmosférou až do vzdialenosti 500 km od zdroja sopečnej erupcie.

K obmedzeniu škôd a počtu incidentov spojených so sopečnou aktivitou je dôležitá včasná detekcia kontaminovaného priestoru. Informácie o výške, množstve a pohybe sopečného popola sú nevyhnutné pre leteckú dopravu kvôli bezpečnému plánovaniu letov.

V dnešnej dobe sa najčastejšie využívajú družice. Pomocou snímok z družíc je možné určiť veľkosť sopečného mraku a taktiež predpovedať jeho pohyb.

V skorých štádiách erupcie je veľmi užitočný radar, pretože na začiatku erupcie sopečný oblak vyvrhnutý do atmosféry je veľmi hustý, a tým pádom radar dokáže poskytnúť informácie o výške stĺpca a veľkosti sopečného mraku.

### 2.1 Vizualne pozorovanie

Sopečný mrak je pohľadom možné spozorovať iba za jasného dňa a dobrých meteorologických podmienkach. Letová posádka môže identifikovať sopečný mrak ako mrak neobvyklého sfarbenia, najčastejšie v odtieni hnedej. V tomto prípade je pre posádku dôležité aby sa danému mraku vyhla, pretože prelet sopečným mrakom by mohol ohroziť bezpečnosť letu. Počas nočného letu je sopečný mrak pre posádku nemožné rozoznať od bežného mraku, avšak pri prelete sopečným mrakom, by posádka mohla pozorovať výboje statickej elektriny v podobe Eliášovho ohňa.

Dôkazom prítomnosti častíc sopečného popola v atmosfére je zmena sfarbenia slnka do chladnejších farieb. Priame vizualne pozorovanie sopečného mraku závisí na poznatku pozorovateľa o vypuknutí sopečnej erupcii a dobrých meteorologických podmienkach.

## 2.2 Detekcia prostredníctvom pozemných radarov

Pozemné radary sú navrhnuté tak, aby boli schopné zachytiť zrážky v atmosfére ( meteorologický radar) alebo zachytiť pohybujúci sa objekt ( ATC a vojenský radar ). Tieto radary bežne pracujú v X, C alebo S pásme a ojedinele v L pásme. Optimálna vlnová dĺžka pre radar na zachytenie sopečného popola sa pohybuje v rozmedzí od 3 mm do 3 cm v K pásme [10]. To je dôvod, prečo pozemné meteorologické radary, ktoré operujú v X pásme dokážu zachytiť sopečný popol. Ideálna vzdialenosť pre meteorologický radar zachytiť sopečný popol je do 100 km od sopečnej erupcie [11]. Sopečný mrak je v tomto čase ešte stále veľmi hustý a obsahuje veľké sopečné častice.

Tab. 1 : Frekvenčné pásma radarov [12]

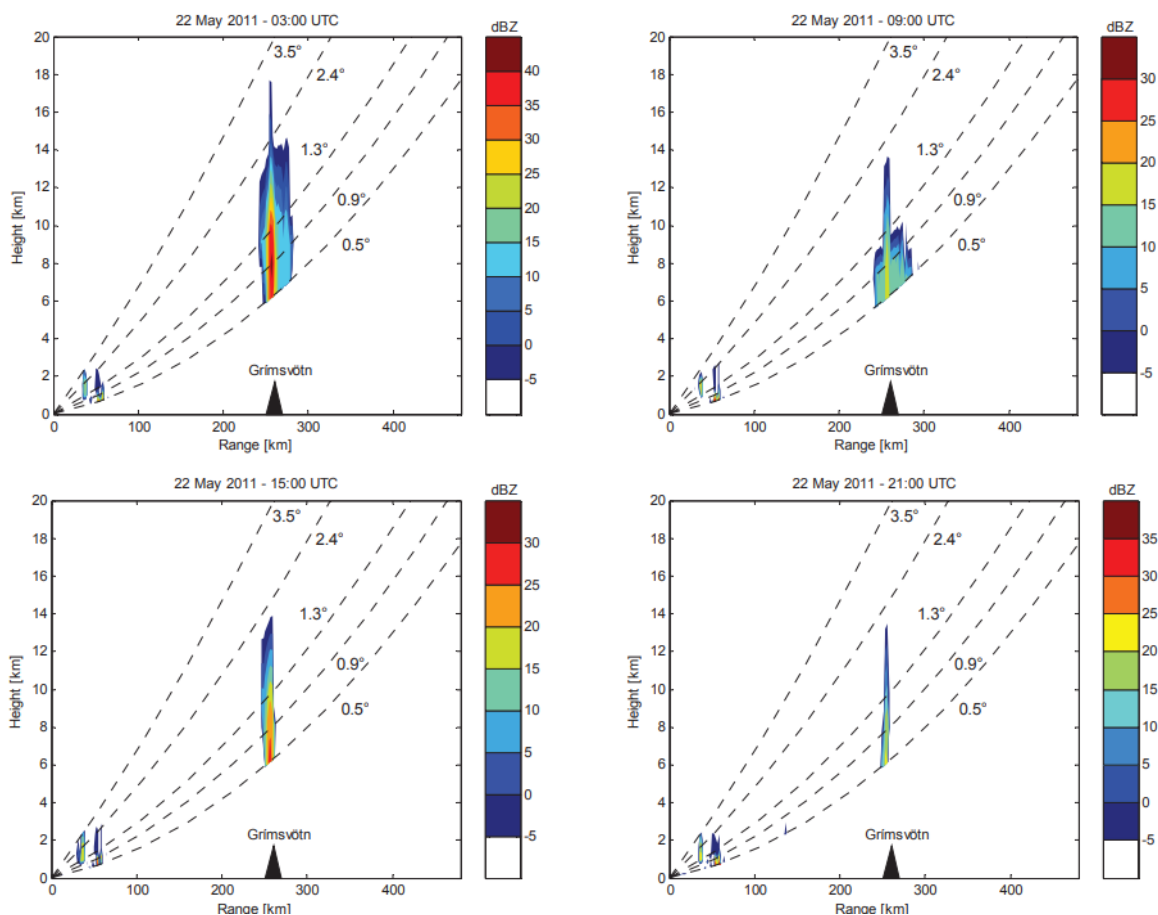
Frekvenčné pásma radarov			
Pásma	Frekvencia	Vlnová dĺžka	Použitie
VHF	50-330 MHz	1-10 m	Prehľadové radary veľmi dlhého dosahu
UHF	300-1000 MHz	0,3-1 m	Palubné prehľadové radary
L	1-2 GHz	15-30 cm	Radary RLP, prehľadové radary dlhého dosahu
S	2-4 GHz	7,5-15 cm	Zbraňové a meteorologické radary
C	4-8 GHz	3,75-7,5 cm	Meteorologické radary
X	8-12 GHz	2,5-3,75 cm	Palubné radary, mapovacie radary
Ku	12-18 GHz	1,6-2,5 cm	Radary so syntetickou apertúrou
K	18-27 GHz	1,1-1,6 cm	Využitie frekvencie limitované kvôli absorpcii
Ka	27-40 GHz	7,5-11 mm	Palubný radar na krátke vzdialenosti
Mm	40-300 GHz	1-7,5 mm	Palubný radar a skenery na letisku

Pozemný radar je jediná spoľahlivá možnosť, ako určiť skutočnú výšku sopečného stĺpca. Zo štúdií, ktoré sa zaoberali danou problematikou vyplýva, že pozemné radary sú vhodným prístrojom na zachytenie sopečného popola. Radarmi pracujúcimi v K pásme a na základe Dopplerovho javu a polarizácie signálu je možné určiť veľkosť, tvar a rýchlosť sopečnej častice [11]. Hlavnou nevýhodou je vysoká cena a fakt, že pozemný radar by musel byť umiestnený v blízkosti sopky a sopečná erupcia danej sopky by nemusela nastať ani raz za dekádu alebo dlhšiu dobu. V budúcnosti by sa mohli využívať mobilné radary, ktoré by sa vedeli premiestňovať medzi sopkami so zvýšenou aktivitou, a tým včas zachytiť sopečnú erupciu a predpovedať pohyb sopečného mraku.

Meteorologický radar sa ukázal ako spoľahlivá voľba pri detekcii sopečného mraku. Radar dokáže určiť výšku sopečného stĺpca, a taktiež určiť veľkosť sopečných častíc. Vďaka Doplerovmu javu je radarom možné predpovedať pohyb sopečného mraku a rýchlosť akou sa šíri v atmosfére. Výhodou radaru je nezávislosť na poveternostných podmienkach a schopnosť poskytovať informácie cez deň ako aj v noci. Na druhej strane nevýhodou meteorologického radaru je dlhá doba počas ktorej je schopný sa otočiť okolo vlastnej osi, čo znamená monitorovanie oblasti v rozsahu 360 stupňov. Doba počas ktorej je meteorologický radar schopný sa otočiť okolo vlastnej osi je niekedy až 10 minút, avšak využitie radaru v spolupráci s príslušným meteorologickým úradom môže byť výhodnou voľbou pre niektoré letiská.[13]

V experimente, ktorý uskutočnil Hoblitt v roku 1997 [14], bol Doplerov radar použitý na monitorovanie trajektórie, rýchlosti a určenie výšky sopečného mraku počas sopečnej erupcie v Mexiku City vo vzdialenosti 60 km od sopky. Prebiehalo neustále monitorovanie vulkanickej aktivity prostredníctvom radaru, čo viedlo k zbieraniu seizmických dát a následne k ich analýze. Počas vulkanickej erupcie dochádzalo k odrazeniu signálu z radaru, čo signalizovalo prítomnosť sopečného popola v ovzduší. Na radare, ktorý bol použitý počas experimentu došlo k poruche hardwarovej časti, avšak bolo jednoznačne preukázané, že radar je vhodným prístrojom pre monitorovanie vulkanickej aktivity a dokáže včasne varovať letectvo pred nebezpečím. [15]

V ďalšej štúdii bol použitý taktiež meteorologický radar v Keflavíku, ktorý sa nachádzal 260 km od sopky Grímsvötn. Daný radar pracoval v C pásme s vlnovou dĺžkou 5 cm a frekvenciou 6 GHz. Experiment začal 21. 5 v roku 2011 o 19:50 UTC a prebiehal až do 28.5.2011 do 23:55 UTC. Radarové snímky boli dostupné z IMO (Icelandic Meteorological Office) každých 5 minút, čo predstavovalo celkovo 2053 snímok počas experimentu. Počas experimentu bolo použitých 5 elevačných uhlov konkrétne 0.5°, 0.9°, 1.3°, 2.4° a 3.5°. Do úvahy treba brať fakt, že ak je vzdialenosť radaru od sopky 260 km a elevačný uhol je nastavený na 3.5°, tak maximálna detekovateľná výška radaru je 20 km v prípade štandardnej atmosféry. [16]



Obr. 4 : Radarové snímky počas sopečnej erupcie v Keflavíku medzi 22 Májom 2011 03:00 UTC a 22 Májom 21:00 UTC [16]

## 2.3 Vesmírna detekcia

Veľké množstvo satelitov, ktoré sú v dnešnej dobe v prevádzke sú schopné zachytiť sopečný mrak. Satelity je možné rozdeliť do dvoch kategórií, a to na geostacionárne a polárne satelity. Polárne satelity obiehajú Zem vo výške medzi 700-1200 km a sú synchronizované so slnkom, čo znamená, že satelit obieha rovnaký bod na Zemi v rovnaký čas každý deň. Geostacionárne sa pohybujú rovnakou rýchlosťou ako je rýchlosť zemskej rotácie, čo znamená, že sa nachádzajú na rovnakom mieste voči pozorovateľovi zo zeme. Nachádzajú sa v oblasti rovníka vo výške 36000 km. Výhodou polárnych satelitov je pokrytie celej planéty a kvalita satelitných obrázkov. Ich využitie je hlavne v oblasti meteorológie, navigácie a mapovania oblasti. Hlavným využitím geostacionárnych satelitov je v oblasti telekomunikácie a meteorológie. K detekcii sopečnej aktivity sú využívané hlavne polárne satelity, a to z dôvodu, že so sebou nesú

senzory ako AVHRR ( Advanced Very High Resolution Radiometer) alebo TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). [17]

Pri veľkých vzdialenostiach (  $10^2$  až  $10^4$  km) [18] od sopečnej erupcie je veľmi náročné rozoznať vulkanický mrak od bežného meteorologického mraku pomocou radaru alebo vizuálnym pozorovaním. Satelity predstavujú unikátnu možnosť ako detegovať sopečný mrak a predpovedať jeho pohyb a veľkosť.

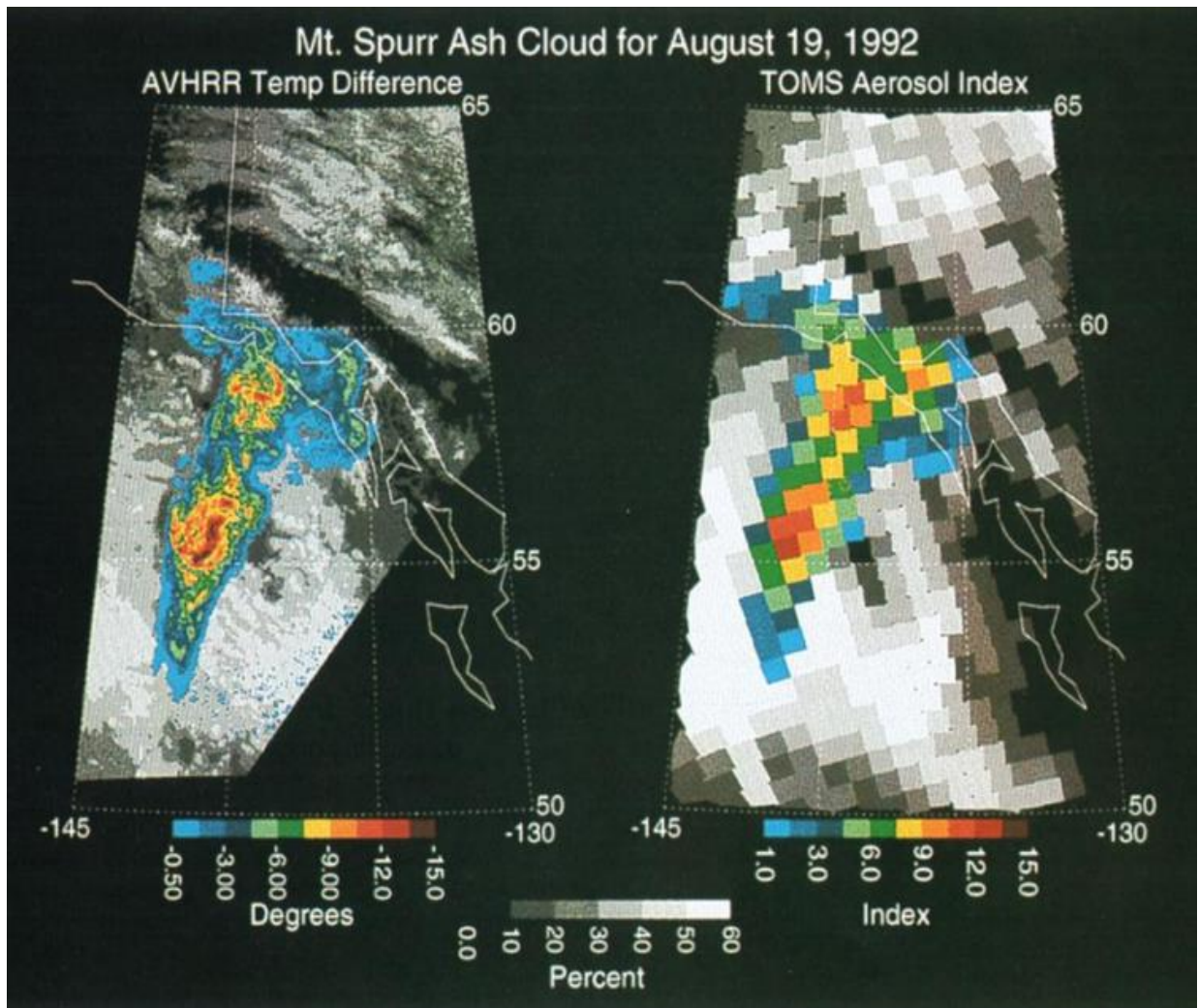
Jednou z možností ako detegovať sopečný mrak je pomocou spektrometra TOMS ( Total Ozone Mapping Spectrometer), ktorý meria celkové množstvo ozónu v atmosfére a skúma ultrafialovú časť spektra. Tento spektrometer bol využívaný na detekciu oxidu siričitého ( $SO_2$ ) v atmosfére. Aerosólový index je najpoužívanejším pojmom v oblasti detekcie sopečných častíc prostredníctvom satelitov, ktoré pracujú v ultrafialovom pásme. [19]

Ďalšou možnosťou ako detegovať sopečný mrak je pomocou AVHRR ( Advanced Very High Resolution Radiometer), ktorý pracuje na princípe rozdielnych intenzít žiarení.[20] AVHRR pracuje v 5 pásmach ( 2 viditeľné a 3 infračervené), avšak k detekcii sopečných častíc sa hlavne využívajú pásma 4 a 5. Na základe rozdielnych dát z kanálu 4 a 5 ( rozdielne intenzity žiarenia detegovaných mrakov), je možné rozlíšiť sopečný mrak od bežného meteorologického mraku. Táto technika funguje najlepšie v dobe, keď sa sopečný oblak rozptýlil zo sopečného kužeľa a stál sa polopriehľadným, ale jeho hustota neklesla pod nedetegovanú úroveň.

Tab. 2 : Charakteristika AVHHR pásiem [20]

<b>Pásmo</b>	<b>Vlnová dĺžka (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Špecifikácia</b>	<b>Využitie</b>
1	0,58-0,68	Viditeľné	Denná oblačnosť
2	0,725-1,10	Viditeľné	Povrchová vodná vegetácia
3	3,55-3,93	Infračervené	Nočná oblačnosť, lesné požiare
4	10,30-11,30	Infračervené	Teplota morí a povrchu, denná a nočná oblačnosť
5	11,50-12,50	Infračervené	Teplota morí a povrchu, denná a nočná oblačnosť





Obr. 5 : Porovnanie satelitných snímok zachytené pomocou AVHRR a TOMS [17]

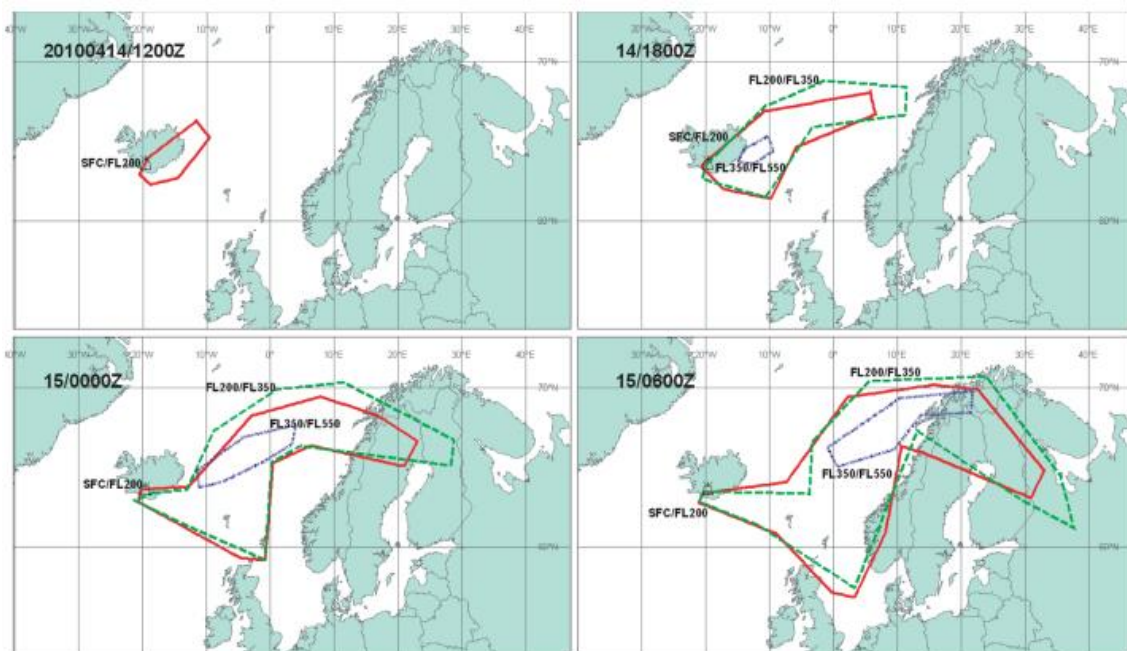
Na obrázku č. 5 je vľavo znázornená satelitná snímka pomocou AVHRR, kde je vidieť rozdielne intenzity žiarenia sopečných častíc v porovnaní s meteorologickým mrakom. Rozdiel je zaznamenaný v Kelvinovej stupnici a sivá časť predstavuje bežný mrak. TOMS je znázornený v pravej časti obrázku a poukazuje na rozdielny aerosólový index, ktorý sa meria v  $\mu\text{m}$ .



### 3. Incidenty spojené so sopečným popolom

V roku 2010 došlo k sopečnej erupcii islandskej sopky Eyjafjallajökull, ktorá mala najväčšie ekonomické následky od čias 2. svetovej vojny. Oblak sopečného mraku dosahoval až do výšky 11 kilometrov, ktorý vďaka silnému východnému vetru bol rozfukovaný nad Európu. Výsledkom bolo zrušenie viac ako 100 tisíc letov v priebehu 7 dní a ekonomické straty pre aerolínie dosahovali až 1,7 miliardy USD. [21]

K sopečnej erupcii došlo 14. apríla 2010 a následne v noci zo 14 na 15. apríla bol uzatvorený vzdušný priestor v severných štátoch Spojeného kráľovstva, v Nórsku, Švédsku a taktiež v Dánsku. K najväčšiemu ochromeniu vzdušného priestora v Európe došlo medzi 17-19. aprílom, kedy bola letecká doprava pozastavená vo väčšine štátov Európskej únie.. Táto sopečná erupcia mala za následok uzatvorenie letovej prevádzky v 19 krajinách Európskej únie. Londýnske letisko Heathrow bolo zasiahnuté najviac spomedzi najväčších medzinárodných letísk v Európe a letová prevádzka na vyššie spomenutom letisku bola obmedzená na takmer 5 dní. Medzi 19 spomenutých krajín patrilo :Belgicko, Česko, Dánsko. Estónsko, Fínsko, Holandsko, Írsko, Litva, Lotyšsko, Luxembursko, Maďarsko, Nemecko, Poľsko, Rakúsko, Rumunsko, Slovensko, Slovinsko, Švédsko a Veľká Británia. Naopak bez obmedzení ostali štáty: Cyprus, Grécko Malta, Portugalsko a Španielsko. [22]



Obr. 6 : Poloha sopečného mraku medzi 14-15. aprílom [21]

Na začiatku sopečnej erupcie bola najvyššia akceptovaná hodnota hustoty popola v atmosfére  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pohyb sopečného mraku a predpoveď VAAC indikovali, že daná akceptovaná hustota bude dosiahnutá najprv v oblasti Škandinávie a neskôr aj v oblasti Spojeného kráľovstva a západnej Európy, ako je možné vidieť na obrázku č. ?. Na základe tejto predpovede bolo 15. apríla zrušených 80% IFR letov v Európe. [21]

19. apríla 2010 medzinárodná organizácia civilného letectva zriadila IVATF s cieľom vyvinúť globálny bezpečnostný manažment, ktorý by rozhodoval o bezpečnosti letovej prevádzky v kontaminovanom vzdušnom priestore. [23]

Uzatvorenie letísk a vzdušného priestoru viedlo ku kritike VAAC máp a k tolerancii množstva popola v ovzduší. IATA oznámila, že z 200 tisíc letov prevádzkovaných v európskom vzdušnom priestore, nedošlo ani k jednému hláseniu o prítomnosti sopečného popola, čo sa neskôr potvrdilo pozemnými kontrolami motorov. [24]. Letecké spoločnosti nezistili žiadnu prítomnosť alebo poškodenia na lietadle pri testovacích letoch v uzavretých vzdušných priestoroch, avšak boli hlásené prípady kedy došlo k poškodeniu na vojenských lietadlách, ktoré prelietali kontaminovanú oblasť [25]

Nepriaznivá situácii spojená s erupciou na Islande viedla 19. apríla k stretnutiu európskych ministrov, počas ktorého boli riešené možné scenáre obnovy letovej prevádzky v Európe. Výsledkom bolo vytvorenie nových letových zón, kde množstvo prijateľnej koncentrácie sopečného popola v ovzduší bolo  $200\text{--}2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Daná oblasť bola označená červenou farbou a oblasti s vyššou koncentráciou ako  $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  predstavovali pre letecké spoločnosti bezletovú oblasť. Letecké spoločnosti mohli prelietavať červenou oblasťou iba ak boli splnené podmienky o údržbe a kontrole lietadiel a letecké spoločnosti mali zmluvu s výrobcami lietadiel a motorov o prevádzke v kontaminovanom priestore. Taktiež letecké spoločnosti museli zaviesť postupy pre danú prevádzku v kontaminovanom priestore, ktoré museli byť schválené príslušným leteckým úradom. O mesiac neskôr boli vytvorené ďalšie letové oblasti, sivej farby, kde koncentrácia sopečného popola v ovzduší dosahovala hodnoty  $2000\text{--}4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konečnou bezletovou oblasťou sa stala oblasť čiernej farby s koncentráciou väčšou ako  $4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . [21]

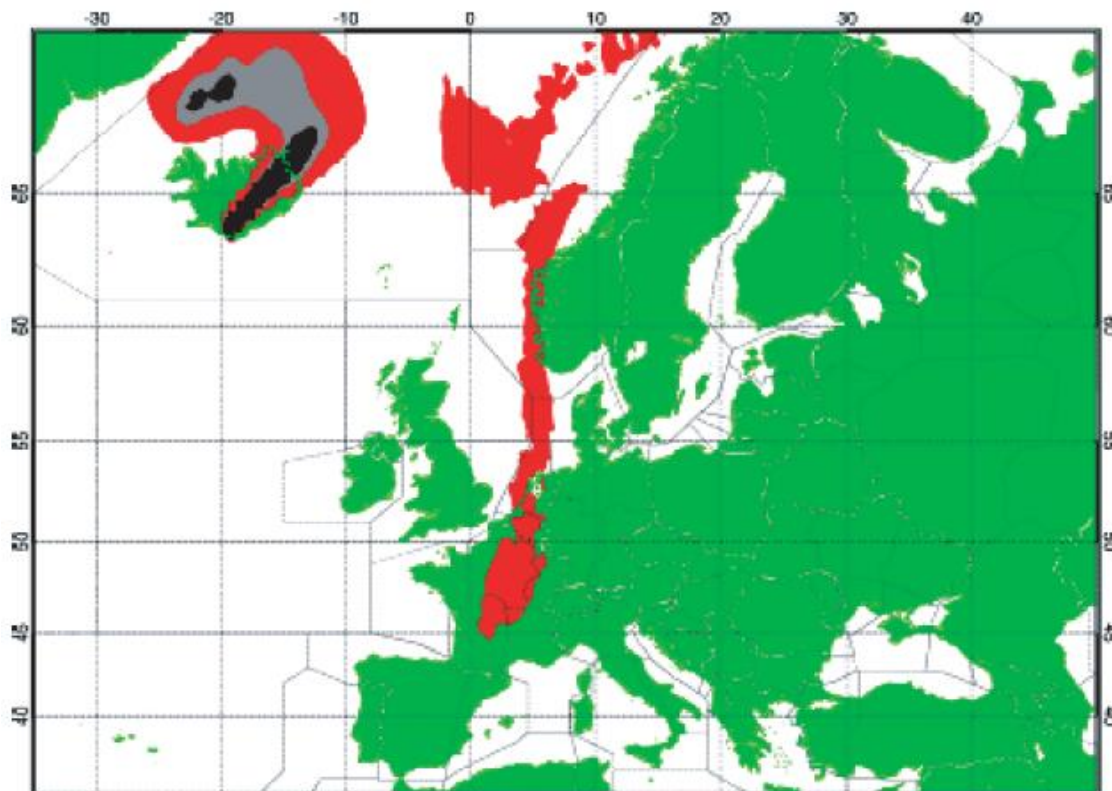


### Modelled Ash Concentration from FL000 to FL200 at 0000 UTC 20/05/2010

Issue time: 201005191800

This is a guidance product generated from model data and is supplemental to the official VAAC London Volcanic Ash Advisory and Volcanic Ash Graphic products. FIR boundaries are indicated for reference

- Predicted area where volcanic ash may be encountered
- Predicted area of ash concentrations in which flights are permitted with an appropriate safety case and agreement from engine and airframe manufacturers
- Predicted area of ash concentrations that exceed acceptable engine manufacturer tolerance levels



Obr. 7 : Koncentrácia sopečného popola v jednotlivých oblastiach do letovej hladiny FL200 [21]

V súčasnosti Európska komisia povolila prevádzkovateľom letov prijať rozhodnutie o plánovaní letov v kontaminovanom priestore. Rozhodnutie prevádzkovateľov by malo byť založené na posúdení rizika spojeného s preletom kontaminovanou oblasťou a dané rozhodnutie musí byť schválené úradmi. Počas plánovania letov predpokladaná koncentrácia popola v ovzduší nemôže prekročiť hodnotu  $4000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a aktuálna hodnota koncentrácie by nemala prekročiť hodnotu  $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . [26]

### 3.1 Let British Airways 009

Lietadlo Boeing 747 spoločnosti British Airways smeroval z Kuala Lumpur do austrálskeho mesta Perth. Incident sa udial v roku 1982 a došlo k preletu lietadla sopečným mrakom. Posádka lietadla nebola informovaná o vulkanickej aktivite na ich trase. Prvou indikáciou o prelete sopečným mrakom bol zápach pripomínajúci pálenie elektronických súčiastok. Na čelnom skle sa začali tvoriť elektrostatické výboje zvané ako Eliašov oheň. V letovej hladine FL 370 došlo k poruche na jednom zo štyroch motorov a následne boli hlásené poruchy na všetkých štyroch motoroch. Posádka sa pokúšala o opätovne naštartovanie motorov avšak bez úspechu. Lietadlo začalo klesať bez akéhokoľvek výkonu a kabínová výška začala stúpať. V okamihu keď kabínová výška dosiahla hodnoty 14000 stôp, došlo k aktivácii kyslíkových masiek pre cestujúcich. Počas klesanie posádka lietadla dostávala chybné varovania o vysokom uhlu nábehu známy ako stall warning a taktiež varovania o požiari na palube lietadla. Pitot- statická sonda bola po prelete sopečným mrakom upchatá, čo viedlo k chybnjej indikácii rýchlosti letu a výšky lietadla. Vo výške 12000 stôp sa posádke podarilo úspešne naštartovať jeden motor a následne boli úspešne spustené všetky 4 motory. Posádka lietadla uviedla lietadlo do stúpania, avšak vo výške 15000 stôp na čelnom skle sa opäť začali tvoriť výboje elektrostatickej elektriny a došlo k vysadeniu druhého motora. Lietadlo bolo následne prevedené do nižších letových hladín mimo prítomnosť sopečného popola. Po vyhlásení núdze bolo lietadlo povolené k núdzovému pristátiu na letisku v Jakarte. Pristátie na letisku v Jakarte bolo aj napriek poškodenému čelnému sklu, poruche motora a chybnjej indikácii výšky a rýchlosti letu úspešné.

## **4. Postupy spojené s kontamináciou vzdušného priestoru ČR sopečným popolom**

Postupy, ktoré by mali byť dodržané počas kontaminácie vzdušného priestoru sú uvedené v dokumente ICAO EUR Doc 019, Part 2 Volcanic Ash Contingency Plan- European and North Atlantic Regions.

Hlavným princípom počas kontaminácie vzdušného priestoru je rýchla výmena informácií medzi jednotlivými subjektami a uplatnenie platných leteckých predpisov. Letová posádka pri spozorovaní vulkanického popola je povinná doručiť túto informáciu príslušnému stanovisku leteckých prevádzkových služieb. Túto informáciu letecké informačné služby odovzdávajú prostredníctvom príslušných meteorologických pracovísk na MWO Praha (ČHMÚ/ OLM Praha), ktoré zaistia zostavenie a distribúciu správ AIREP SPECIAL na výskyt vulkanického popola vo FIR Praha. Subjekty, ktoré disponujú monitorovacími prístrojmi na detekciu sopečného popola v atmosfére hlásia prítomnosť sopečného popola vo FIR Praha prostredníctvom MWO Praha na príslušné VAAC.

Česká republika počas výskytu sopečného popola v jej vzdušnom priestore nezriaďuje takzvaný nebezpečný priestor. Počas letu v kontaminovanom vzdušnom priestore nesie plnú zodpovednosť letová posádka. Prevádzkovateľom letov je doporučené nevykonávať lety v priestoroch s vysokou koncentráciou sopečného popola a toto odporúčanie sa vzťahuje aj na lety, ktoré zaisťujú bezpečnosť, ochranu a záchranu života obyvateľov ČR.

Počas pred-erupčnej fázy a fázy začiatku erupcie daným subjektom nevznikajú žiadne povinnosti, avšak letové posádky sú povinné sledovať informácie týkajúce sa vývoja sopečnej erupcie.

Na základe informačných správ vydaných VAAC počas fázy prebiehajúcej erupcie vydáva MWO Praha výstražnú informáciu VA SIGMET na pozorovaný alebo predpokladaný výskyt sopečného popola vo FIR Praha. VA SIGMET by mal byť vyhlásený čo najskôr a musí byť obnovovaný každých 6 hodín. V prípade, keď nie je predpovedaná ďalšia prítomnosť sopečného popola vo vzdušnom priestore, je VA SIGMET zrušený. Na základe predpisu L 15 je počas prebiehajúcej erupcie vydávaný taktiež VA NOTAM, kde sú publikované všeobecné informácie o výskyte sopečného

popola vo vzdušnom priestore ČR, avšak táto správa neobsahuje konkrétnu polohu sopečného mraku, ale odkazuje na VA SIGMET.

Letová posádka je povinná hlásiť akékoľvek rozdiely medzi publikovanými informáciami a skutočnosťou príslušným subjektom.

Počas udalostí spojených so sopečnou aktivitou sa vo vzdušnom priestore ČR zriaďuje VA krízový štáb, ktorého hlavnou úlohou je distribúcia príslušných informácií a navrhnutie riešenia danej situácie. O aktivácii krízového štábu rozhoduje Ministerstvo dopravy Českej republiky/ Odbor civilného letectva. [27,38]

## 4.1 SIGMET

SIGMET je informácia vydaná MWO o nebezpečných meteorologických javoch, ktoré by mohli určitým spôsobom ohroziť bezpečnosť letovej prevádzky. K nebezpečným javom, ktoré by mohli ohroziť bezpečnosť letu, patria javy uvedené nižšie v tabuľke číslo 3.

Tab. 3 : Nebezpečné meteorologické javy publikované v SIGMETE a ich skratky [29]

Nebezpečný meteorologický jav	Skratka
Búrka	TS
Búrka s krúpami	TSGR
Silná turbulencia	SEV TURB
Silná námraza	SEV ICE
Silná námraza spôsobená mrznúcimi zrážkami	SEV ICE FZRA
Výrazné vlnové prúdenie za orografickými prekážkami	SEV MTW
Silné prachové búrky	SEV DS
Silné piesočné búrky	SEV SS
Tropické cyklóny	TC
Výskyt sopečného popola	VA
Výskyt rádioaktívneho mraku	RDOACT CLD

Forma správy sa vydáva v podobe skratiek pre príslušné letecké informačné oblasti a jej platnosť je maximálne 4. hod (v prípade sopečného popola je platnosť až 6 hod. ). Pre jeden SIGMET môže byť publikovaný vždy iba jeden nebezpečný jav. Za zmienku stojí

fakt, že SIGMET informáciu je nutné vydať pre určitú letovú hladinu a nie je stanovený žiaden spodný limit, pre ktorý by mala byť táto informácia vydaná. Informácia o prítomnosti nebezpečného javu vo vzdušnom priestore je dôležitá pre letové posádky v každej fáze letu, a kvôli tomu by MWO malo vydať SIGMET bez ohľadu na výšku daného nebezpečného javu. Požiadavky pre všetky SIGMETY sú publikované v Annexe 3.

```
Volcanic Ash (WV) SIGMET Example  
WVJP31 RJTD 210320  
RJJJ SIGMET E05 VALID 210320/210920 RJTD-  
RJJJ FUKUOKA FIR VA ERUPTION MT SAKURAJIMA-  
WAKAMIKO(AIRA-CALDERA) PSN N3136 E13039 VA CLD OBS  
AT 0215Z WI N3020 E13225 - N3051 E13328 - N3056 E13414  
-N3042 E13422 - N3009 E13229 - N3020 E13225 SFC/FL170 FCST  
AT 0815Z WI N2939 E13308 - N2936 E13456 - N3116 E14050 -  
N2923 E13534 - N2856 E13219 - N2939 E13308= AND WI N3134  
E13042 - N3121 E13117 - N3110 E13108 - N3119 E13031 - N3134  
E13042 SFC/FL170 NC FCST AT 0815Z WI N3113 E13012 - N3129  
E13045 - N3020 E13114 - N3045 E13627 - N2946 E13155 - N3003  
E13034 - N3113 E13012 =
```

Obr. 8 : Príklad SIGMETU [28]

*Prepis správy: Správa bola vydaná 21. deň v mesiaci v 03:20 UTC pre Tokijskú oblasť. V daný deň to bol 5. vydaný SIGMET a jeho platnosť bola v čase medzi 03:20 UTC – 09:20 UTC v 21. dni daného mesiaca. Správa bola publikovaná pre Fukuoka, letovú informačnú oblasť a došlo k erupcii sopky Sakurajima-Wakamiko, ktorej poloha je N3136 E13039. Sopečný mrak bol spozorovaný v čase 02:15Z a jeho poloha sa pohybovala medzi N3020 E13225 – N3051 E13328 – N3056 E13414- N3042 E13422 – N3009 E13229- N3020 E13225 od zeme až do letovej hladiny 170. Ďalšie informácie publikované v danom SIGMETE predstavovali už iba predpovedaný pohyb sopečného mraku v jednotlivých časových úsekoch.*

## **4.2 Orgány sledujúce sopečnú činnosť**

S postupne sa rozrastajúcou leteckou dopravou začali pribúdať incidenty spojené so sopečnou činnosťou, čo viedlo k zavedeniu subjektov k monitorovaniu danej problematiky. V roku 1982 zaviedla Medzinárodná organizácia civilného letectva takzvanú Volcanic Ash Warnings Study Group (VAWSG), ktorej úlohou bola detekcia sopečnej činnosti a informovanie o prítomnosti sopečného mraku vo vzdušnom priestore. Hlavným zdrojom informácií boli satelitné snímky a hlásenia posádok, ktoré prelietavali v blízkosti kontaminovanej oblasti.

V roku 1987 vznikla Medzinárodná služba pre sledovanie sopečného popola (IAVW), ktorej úlohou je šíriť informácie medzi dotknutými subjektami, detegovať sopečné erupcie a predpovedať pohyb sopečného mraku. Jednoducho povedané, úlohou IAVW je zabrániť stretu lietadla so sopečným popolom vo vzdušnom priestore.

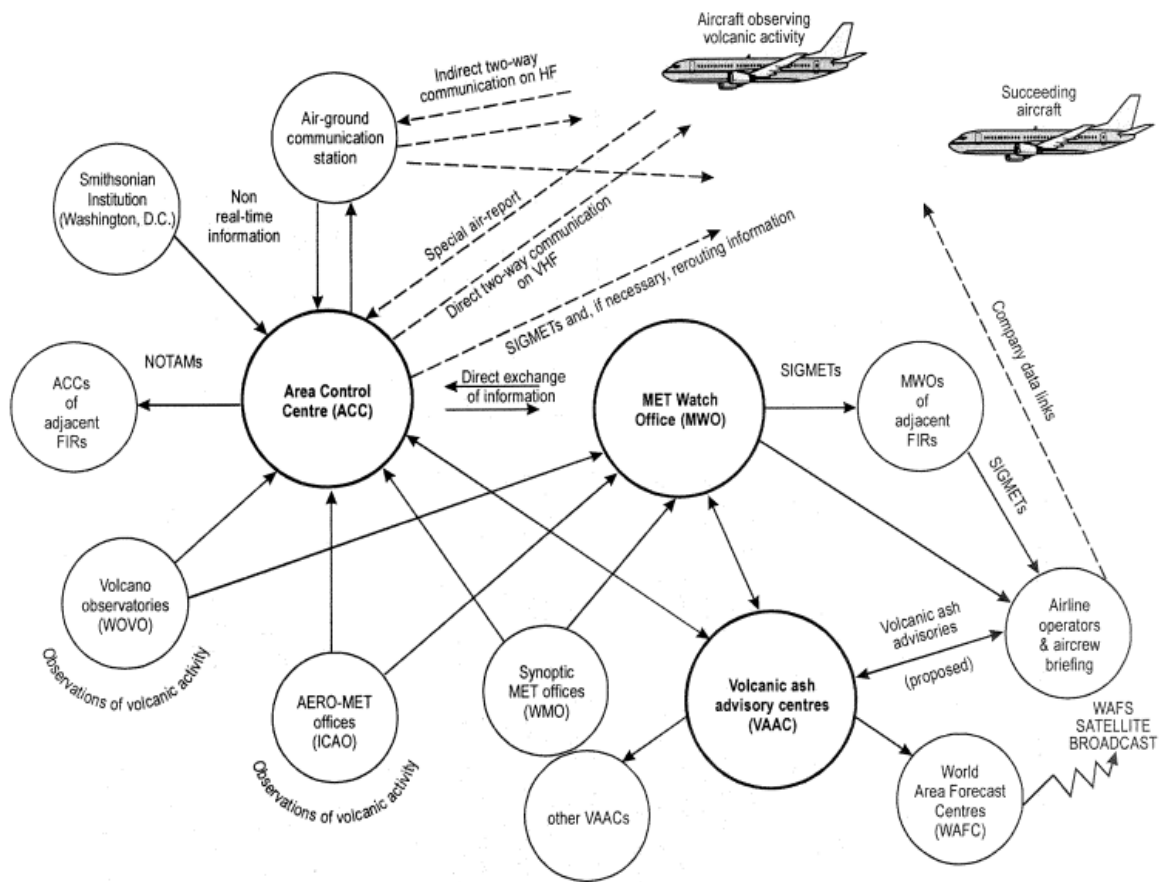
### **4.2.1 Medzinárodná služba pre sledovanie sopečného popola (IAVW)**

IAVW, ako už bolo spomenuté vyššie, sa zaoberá detekciou sopečných erupcií a sopečného popola v atmosfére, a taktiež vydáva varovania o prítomnosti sopečného popola v grafickom alebo alfanumerickom formáte (SIGMETY a NOTAMY). V prípade prítomnosti sopečného popola môže byť vydaný aj špeciálny NOTAM, takzvaný ASHTAM, ktorý je vydávaný iba počas sopečnej aktivity, avšak v ČR sa ASHTAM nevydáva a namiesto neho sa používajú SIGMETY alebo NOTAMY.

Detekcia závisí na počiatočných upozorneniach o sopečnej aktivite, ktoré sa ďalej šíria k MWO, ACC a VAAC vulkanologickými agentúrami a ďalšími príslušnými orgánmi. Ak niektorý z vyššie spomenutých orgánov spozoroval sopečnú erupciu v danej oblasti, je povinný kontaktovať najbližšie civilné letectvo alebo meteorologické kontaktné miesto. Tieto kontaktné miesta a komunikačné kanály pôsobia na národnej úrovni a nachádzajú sa v krajinách, ktoré majú aktívne sopky v ich letových informačných regiónoch a sú za nich zodpovedné. V konečnom dôsledku tieto oznámenia sopečných erupcií sa musia dostať k príslušným ACC, MWO a VAAC, aby bolo možné publikovať SIGMETY a NOTAMY o danom nebezpečnom jave.

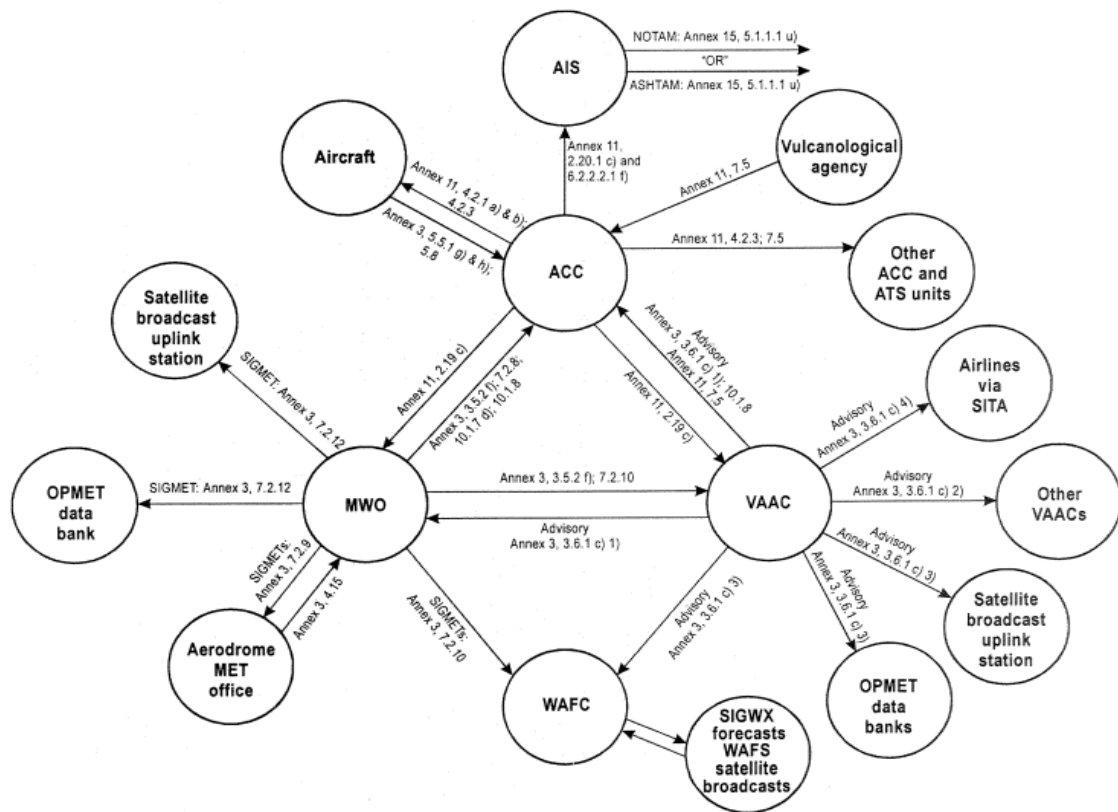


Prepojenie a komunikácia medzi jednotlivými orgánmi sú zobrazené na obrázku č.?-



Obr. 9 : Orgány Medzinárodnej služby pre sledovanie sopečného popola (IAVW) [30]

Poskytovanie špeciálnych leteckých hlásení letovými posádkami predstavovali v mnohých prípadoch počiatkové hlásenia o prítomnosti sopečného popola vo vzdušnom priestore. Podľa postupov pre letové navigačné služby riadenia letovej prevádzky ( PANS ATM, Doc 4444) špeciálne letecké hlásenia, ktoré obsahujú informácie o sopečnej aktivite, by mali byť zaznamenané do osobitného formulára. Tieto hlásenia sú pre VAAC veľmi dôležité, pretože obsahujú informácie o mieste a veľkosti sopečnej erupcie.



Obr. 10 : Regulačné ustanovenia medzinárodnej služby pre sledovanie sopečného popola (IAVW) [30]

## 4.2.2 Meteorologická výstražná služba (MWO)

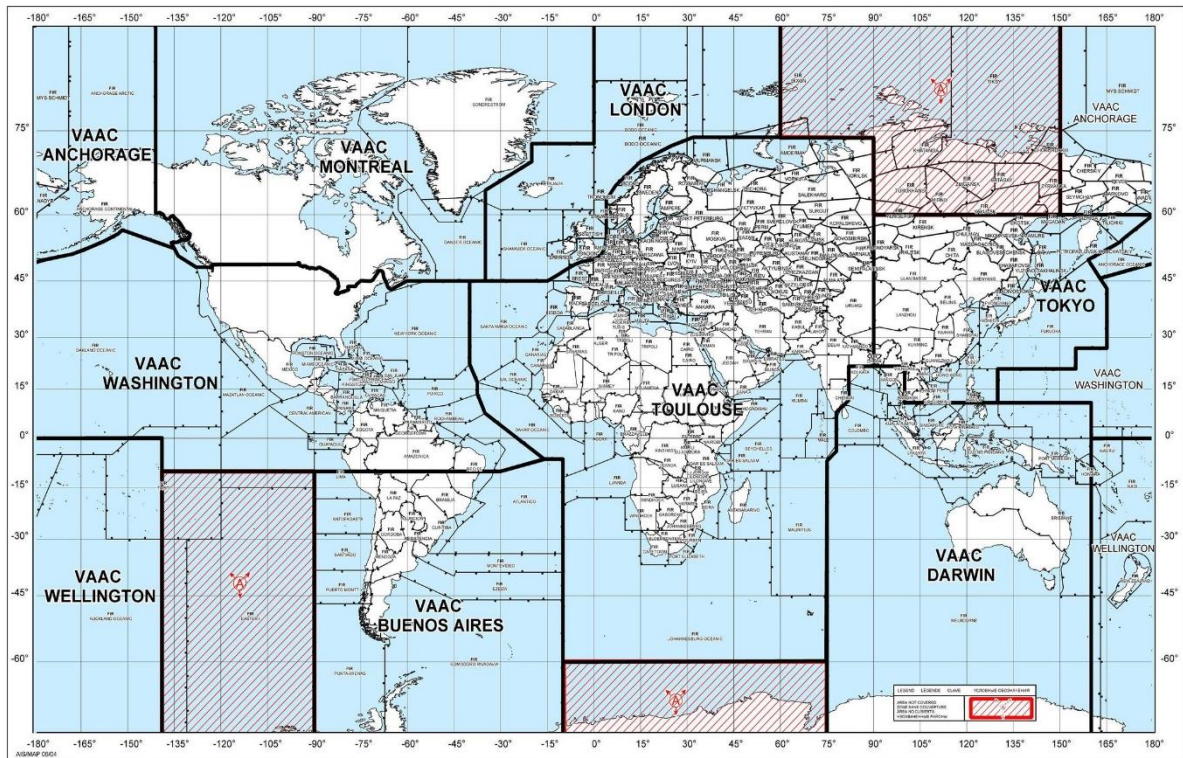
Ak zmluvné štáty ICAO prijmu zodpovednosť o riadení letovej prevádzky danej letovej informačnej oblasti, zmluvný štát musí zriadiť meteorologickú výstražnú službu (MWO) pre danú letovú informačnú oblasť alebo zmluvný štát môže požiadať iný štát o prevzatie zodpovednosti pre danú letovú oblasť. MWO skúma meteorologické podmienky v letovej informačnej oblasti a vydáva SIGMETY alebo AIRMETY v prípade ak by mohlo dôjsť k ohrozeniu bezpečnosti letovej prevádzky kvôli nebezpečnému meteorologickému javu. AIRMET obsahuje informácie pre lety v nižších letových hladinách konkrétne do letovej hladiny 100. Informácie o sopečnej aktivite sú zahrnuté v SIGMETE, bez ohľadu na výšku sopečného mraku.

Meteorologická výstražná služba by mala mať prístup k dátam z polárnych a geostacionárnym satelitov vrátane dát z AVHRR senzorov, z ktorých by bolo možné detegovať prítomnosť sopečného mraku a rozlíšiť ho od bežného meteorologického mraku. Okrem toho daná meteorologická výstražná služba musí byť schopná predpovedať trajektóriu spozorovaného sopečného mraku. V minulosti neboli všetky MWO vybavené dostatočnými technológiami k detekcii sopečnej činnosti, z toho dôvodu ICAO zriadilo deväť VAAC centier, ktorých úlohou je poskytovať poradenstvo pre MWO a ACC v ich zodpovedajúcich oblastiach. [30]

### **4.2.3 Poradné strediská o oblakoch sopečného popola ( VAAC)**

Hlavnou úlohou poradných stredísk (VAAC) je odborné poradenstvo pre ACC a MWO týkajúce sa informácii o rozsahu a predpovedi sopečného mraku v danej letovej oblasti. Informácie o sopečnej aktivite sú spracované meteorologickou výstražnou službou a na základe týchto informácii je vydaný SIGMET. VAAC monitoruje sopečnú aktivitu pomocou údajov získaných z meteorologických satelitov a predpovedá pohyb sopečného mraku pomocou počítačových modelov.

Na svete sa nachádza deväť VAAC ( Anchorage, Buenos Aires, Darwin, London, Montreal, Tokyo, Toulouse, Washington a Wellington), ktoré sú zodpovedné za ich oblasti určené medzinárodnou organizáciou civilného letectva. Na obrázku č. 4.2.3 sú znázornené jednotlivé oblasti, na ktorom je možné vidieť že je pokrytá takmer celá planéta až na niektoré oceánske oblasti alebo oblasti, v ktorých sa nenachádzajú žiadne aktívne sopky.



Obr. 11 : Rozmiestnenie VAAC a ich príslušné oblasti [30]

Za normálnych okolností, VAAC bude informované jednou z MWO o vypuknutí sopečnej erupcie v danej letovej informačnej oblasti a požiada VAAC o poradenské informácie. VAAC čo najrýchlejšie aktivuje ich počítačový model s cieľom poskytnúť informácie o predpovedanom pohybe sopečného mraku. Ďalšou úlohou VAAC je skontrolovať satelitné informácie zo všetkých dostupných zdrojov aby bolo možné posúdiť rozsah kontaminovanej oblasti. Tieto informácie sa ďalej šíria k MWO a ACC spolu s predpovedanou trajektóriou sopečného mraku. Potvrdenie prítomnosti sopečného popola zo satelitných snímok a jeho rozsah je pre MWO a ACC veľmi dôležitou informáciou z dôvodu presmerovania lietadiel mimo kontaminovanú oblasť.

Monitorovanie satelitných snímok a informovanie MWO a ACC o predpokladanom pohybe sopečného mraku pokračuje až do doby kedy nie je zistená žiadna ďalšia prítomnosť sopečného popola vo vzdušnom priestore. V prípade ak VAAC z akéhokolvek dôvodu nie je schopné poskytnúť informácie o predpovedanom pohybe sopečného mraku, môže byť požiadané iné VAAC k poskytnutiu týchto informácií.

## 5. Ohrozenie vzdušného priestoru Českej republiky

Česká republika ma výhodnú zemepisnú polohu pokiaľ ide o vulkanické ohrozenie vzdušného priestoru, keďže sa na jej území nenachádza žiadna aktívna sopka. Ohrozenie vzdušného priestoru ČR záleží od viacerých faktorov akými sú vzdialenosť od zdroja sopečnej aktivity, sila sopečnej erupcie ale aj od meteorologických podmienok v čase sopečnej erupcie. Poloha sopiek a ich vzdialenosti od hraníc Českej republiky, ktoré by potencionálne mohli ohroziť český vzdušný priestor je znázornená v tabuľke nižšie.

Tab. 4 : Poloha sopiek, ktoré predstavujú potencionálne ohrozenie pre ČR.[31]

Názov sopky	Poloha	Krajina	Posledná známa erupcia	Vzdialenosť [km]
Madeira	Madeira	Portugalsko	4500 pr. n.l	3274
Agua de Pau	Azorské ostrovy	Portugalsko	1564	3500
Fayal	Azorské ostrovy	Portugalsko	1958	3680
Furnas	Azorské ostrovy	Portugalsko	1630	3489
Pico	Azorské ostrovy	Portugalsko	1720	3664
San Jorge	Azorské ostrovy	Portugalsko	1907	3630
Sete Cidades	Azorské ostrovy	Portugalsko	1880	3515
Terceira	Azorské ostrovy	Portugalsko	2000	3571
La Palma	Kanárske ostrovy	Španielsko	1971	3670
Lanzarote	Kanárske ostrovy	Španielsko	1824	3369
Tenerife	Kanárske ostrovy	Španielsko	1909	3621
Askja	Island	Island	1961	2519
Bárdarbunga	Island	Island	1911	2533
Brennisteinsfjöll	Island	Island	1341	2698
Eyjafjallajökull	Island	Island	2010	2585
Grímsvötn	Island	Island	2011	2515
Hekla	Island	Island	2000	2602
Hengill	Island	Island	150	2682
Katla	Island	Island	2011	2559
Krafla	Island	Island	1986	2556
Krísuvík	Island	Island	1340	2711
Kverkfjöll	Island	Island	1968	2499
Öraefajökull	Island	Island	1728	2465
Reykjanes	Island	Island	1926	2728
Torfajökull	Island	Island	1477	2576
Campi Flegrei	Taliansko	Taliansko	1538	1006
Ischia	Taliansko	Taliansko	1302	1019
Larderello	Taliansko	Taliansko	1282	811
Vesuvius	Taliansko	Taliansko	1944	1005
Vulsini	Taliansko	Taliansko	104 pr. n. l.	848
Stromboli	Liparské ostrovy	Taliansko	2011	1228
Vulcano	Liparské ostrovy	Taliansko	1890	1271
Etna	Sicília	Taliansko	2011	1346
Pantelleria	Pantelleria	Taliansko	1891	1479

Počas silnejších sopečných erupcií, sopečný popol vyvrhnutý do atmosféry dokáže kontaminovať vzdušný priestor až do vzdialenosti niekoľkých tisíc kilometrov od zdroja sopečnej erupcie. Sila sopečnej erupcie sa udáva v takzvanej VEI (Volcanic explosivity index) stupnici.

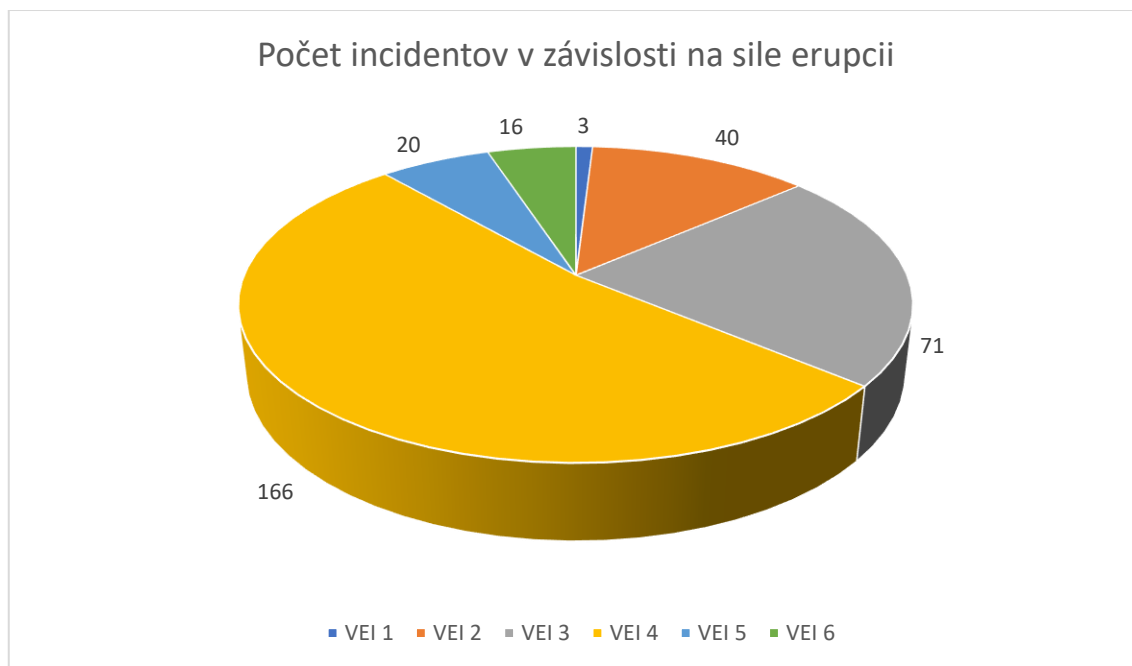
## 5.1 Index sopečnej aktivity ( VEI)

Index sopečnej aktivity bol založený v roku 1982 dvomi britskými vulkanológmi a slúži na klasifikáciu sopečnej činnosti. Táto stupnica obsahuje celkovo 9 stupňov, pričom najslabšia erupcia predstavuje stupeň VEI 0 a najsilnejšia stupeň VEI 8. Jednotlivé stupne sú pridelené na základe množstva vyvrhnutého sopečného materiálu počas erupcie, výšky erupčného stĺpca alebo doby trvania sopečnej erupcie. Hlavným faktorom pri určovaní daného stupňa je celkové množstvo sopečného materiálu vyvrhnutého do atmosféry počas sopečnej erupcie. Od stupňa VEI 2 až po stupeň VEI 8 platí, že mierka stupnice je logaritmického charakteru, čo znamená že množstvo vyvrhnutého materiálu je desaťnásobne vyššie s každým ďalším stupňom [32]. Medzi stupňami VEI 0 a VEI 1 je nárast stonásobný. Stupeň VEI 0 predstavuje sopečnú erupciu, počas ktorej nedošlo k výbuchu, čo ale môže znamenať, že došlo k výlevu lávy na povrch. Naopak pri stupni VEI 7 alebo VEI 8 dochádza k vyvrhnutiu obrovského množstva sopečného materiálu do atmosféry, čo môže mať za následok globálne zmeny klímy. Všeobecne platí, že silné erupcie nenastávajú často, konkrétne stupeň VEI 8 nebol v modernej dobe zaznamenaný ešte ani raz a stupeň VEI 7 nastáva raz za niekoľko tisíc rokov.

Tab. 5 : Parametre a frekvencie jednotlivých stupňov sopečných erupcií [33]

VEI	Výška sopečného stĺpca	Množstvo vyvrhnutého materiálu [m <sup>3</sup> ]	Frekvencia erupcie
0	< 100 m	10 <sup>4</sup>	denne
1	100-1000 m	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	denne
2	1-5 km	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	týždenne
3	3-15 km	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	ročne
4	10-25 km	10 <sup>8</sup> -10 <sup>9</sup>	každých 10 rokov
5	>25 km	10 <sup>9</sup> -10 <sup>10</sup>	každých 100 rokov
6	>25 km	10 <sup>10</sup> -10 <sup>11</sup>	každých 100 rokov
7	>25 km	10 <sup>11</sup> -10 <sup>12</sup>	každých 1000 rokov
8	>25 km	>10 <sup>12</sup>	každých 10000 rokov

Pre leteckú dopravu predstavujú najväčšie riziko hlavne stupne VEI 3 a VEI 4, kvôli pomerne veľkému množstvu vyvrhnutého materiálu do atmosféry a frekvencia týchto erupcií je pomerne častá. Silnejšie erupcie nepredstavujú veľké riziko pre leteckú dopravu z dôvodu ich zriedkavého výskytu. Naopak pri slabších erupciách výška sopečného stĺpca nedosahuje dostatočne vysoké výšky, aby došlo k ohrozeniu lietadiel v ich letových hladinách, avšak slabšie erupcie by mohli predstavovať riziko pri priblíženiach a odletoch.



Obr. 12 : Počty incidentov v závislosti na sile erupcie medzi rokmi 1953 až 2022

Na obrázku č.12 sú znázornené známe incidenty medzi rokmi 1953 až 2022 v závislosti na sile erupcie. Z obrázku je možné vyčítať, že k incidentom dochádza najčastejšie pri stupni VEI 4 celkovo 166 incidentov, čo predstavuje 53 % z celkového počtu známych incidentov. Veľký vplyv na počet incidentov mala sopečná erupcia Eyjafjallajökull, ktorej sila bola klasifikovaná stupňom VEI 4. Pomerne veľké riziko pre letectvo predstavuje aj stupeň VEI 3, počas ktorého došlo k 71 incidentom. Incidenty spojené s VEI 6 súviseli so sopečnou erupciou z roku 1991, kedy došlo k výbuchu sopky Pinatubo, ktorá sa nachádza na ostrove Luzon na Filipínach. Jednalo sa o jednu z najväčších sopečných erupcií 20. storočia a zároveň je to zatiaľ aj posledná sopečná erupcia o sile VEI 6. Aj napriek častému výskytu stupňa VEI 1 došlo iba k 3 incidentom za 69 rokov, čo nepredstavuje veľké riziko pre obchodnú leteckú dopravu.

## 5.2 Závažnosť incidentov

Zo známych incidentov spojených s preletom sopečným popolom boli zdokumentované rozdielne účinky sopečných častíc na lietadlo. Počas niektorých preletov sopečným popolom nedošlo k žiadnym poškodeniam na lietadle a jediným indikátorom prítomnosti sopečného popola boli hlásenia letových posádok v podobe zápachu pripomínajúceho síru alebo elektrostatické výboje, ktoré sa tvorili na čelnom skle lietadla. Iné letové posádky zaznamenali problémy na pohonnej jednotke alebo chybné indikácie letových a navigačných prístrojov.

Aby bolo možné určiť závažnosť poškodenia na lietadle v roku 1994 bol formulovaný takzvaný index závažnosti, ktorý bol navrhnutý výrobcami motorov a trupov lietadiel spoločne s asociáciou dopravných pilotov a následne bol schválený Medzinárodnou organizáciou civilného letectva. V roku 2007 došlo k upraveniu tohto indexu závažnosti Medzinárodnou organizáciou civilného letectva, kedy bola pridaná trieda 0 a došlo k menšej úprave triedy 1.

Tab. 6 : Index závažnosti incidentov [35]

Trieda	Kritéria
0	Zápach pripomínajúci síru v kabíne lietadla Pozorovaný anomálny atmosferický zákal Elektrostatický výboj (Eliašov oheň) na čelnom skle alebo na iných častiach lietadla Sopečný popol spozorovaný letovou posádkou bez ďalších poškodení
1	Prítomnosť malého množstva sopečného popola v kabíne lietadla Usadeniny popola na extérieri lietadla Rozdielne teploty výfukových plynov (EGT) s návratom do normálnych hodnôt
2	Prítomnosť veľkého množstva sopečného popola v kabíne lietadla Kontaminácia klimatizácie vyžadujúca použitie kyslíka Poškodenia spôsobené abráziou vonkajších povrchov, motorov a lopatiek kompresoru Poškodenia na čelnom skle alebo na oknách Zanesenie pitot-statického systému, pri ktorom nedošlo k poruche prístrojov Usadeniny popola v motore
3	Vibrácie motora Zanesenie pitot-statického systému, pri ktorom prístroje indikujú chybné údaje Kontaminácia motorového oleja alebo hydraulických kvapalín Poškodenie elektrických alebo počítačových systémov Poškodenie motora
4	Dočasné zlyhanie motora vyžadujúce reštart motora za letu
5	Zlyhanie motora alebo iné poškodenie vedúce k havárii



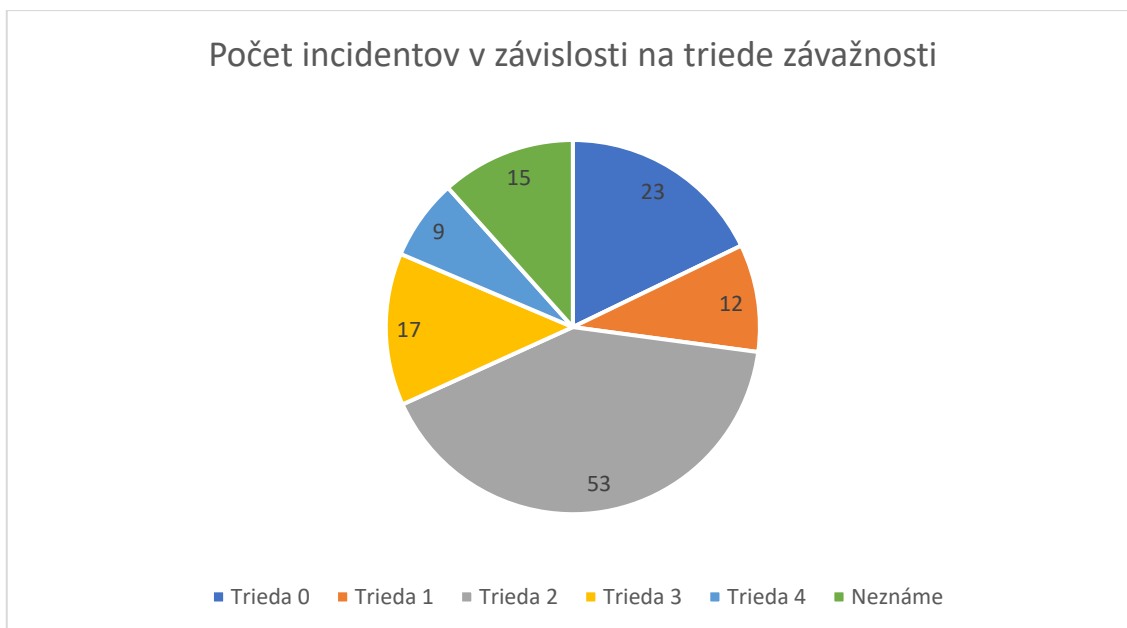
Index závažnosti incidentov je zložený z šiestich tried, kde trieda 0 predstavuje najmenšiu závažnosť a naopak trieda 5 predstavuje najväčšiu závažnosť, ktorá môže viesť až k fatálnym poškodeniam na lietadle vedúce k havárii. Závažnosť triedy 5 nebola za celú históriu letectva zdokumentovaná ani raz.

Od roku 1953 bolo zdokumentovaných 9 incidentov klasifikovaných s indexom závažnosti triedy 4. Počas týchto 9 incidentov došlo k poruche na aspoň jednom motore, kedy posádka lietadla boli nútené k opätovnému reštartu motora za letu. V dvoch prípadoch hlavnou príčinou, ktorá viedla k poruche motora bolo navýšenie výkonu na maximálne hodnoty s cieľom dostať lietadlo do vyšších letových hladín mimo prítomnosť sopečného popola. Počas navýšenia výkonu dochádzalo k nasiaknutiu väčšieho množstva popola do motora, čo viedlo k usadeniu a taveniu sopečného popola v horúcich častiach motora a následnému zlyhaniu. Podrobnejšie účinky sopečného popola na prúdové motory boli rozobrané v kapitole 1. Všetky známe incidenty klasifikované s indexom triedy 4 sú znázornené v tabuľke č. 7.

Tab. 7 : Incidenty s indexom triedy 4 [35]

Dátum incidentu	Zdroj sopečnej erupcie	Výška stretu [km]	Doba stretu [min]	Vzdialenosť od sopky [km]	Typ lietadla	Poškodenie
25.5.1980	Mount St.Helens, USA	4,6-4,9	4	100	C-130	Zlyhanie 2 motorov z celkového počtu 4
24.6.1982	Galunggung , Indonézia	11,3	13	150	B747	Zlyhanie všetkých 4 motorov
13.7.1982	Galunggung , Indonézia	10,1	Neznáma	Neznáma	B747	Zlyhanie 3 motorov z celkového počtu 4
15.12.1989	Redoubt, USA	7,6	8	150	B747	Zlyhanie všetkých 4 motorov
17.6.1991	Pinatubo, Filipíny	11,3	2	930	B747	Zlyhanie 2 motorov z celkového počtu 4
17.6.1991	Pinatubo, Filipíny	Neznáma	Neznáma	Neznáma	DC-10	Zlyhanie 1 motora z celkového počtu 3
27.6.1991	Unzen, Japonsko	11,3	Neznáma	Neznáma	DC-10	Zlyhanie 2 motorov z celkového počtu 3
29.7.2001	Soufriere Hills, Malé Antily	Neznáma	Neznáma	<500	B767	Zlyhanie 1 motora z celkového počtu 2
17.7.2006	Manam, Nová Guinea	11,9	7	250	Gulfstream 2	Zlyhanie oboch motorov

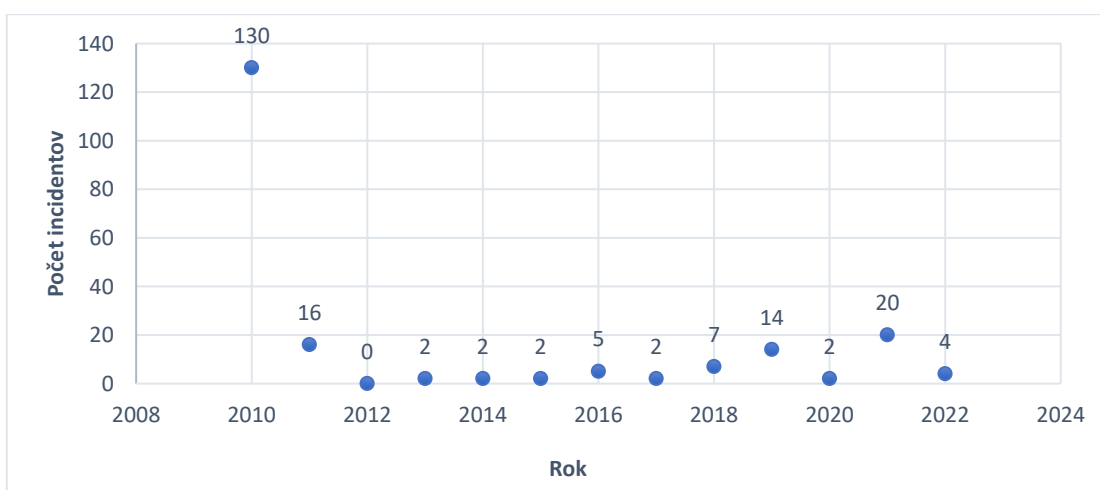
Medzi rokmi 1953 a 2009 bolo zdokumentovaných celkovo 129 incidentov spojených so sopečnou aktivitou. Najčastejšie došlo k závažnosti triedy 2 s celkovým počtom 53 incidentov, čo predstavuje 41 %. Druhou najčastejšou triedou závažnosti bola trieda 0 s počtom 23 incidentov, čo predstavuje 18 %. Pri 15 incidentoch nebolo možné určiť triedu závažnosti z dôvodu nedostatočných dát.



Obr. 13 : Počty incidentov v závislosti na triede závažnosti medzi rokmi 1953 až 2009

## 5.3 Analýza incidentov od roku 2010

V roku 2010 došlo k najväčšiemu prerušeniu leteckej dopravy od čias 2. svetovej vojny. Celkovo bolo zdokumentovaných 206 hlásení medzi rokmi 2010 až 2022. Najväčší vplyv na počet incidentov mala sopečná erupcia Eyjafjallajökull, počas ktorej bolo zdokumentovaných 130 incidentov, čo predstavuje 63 %.



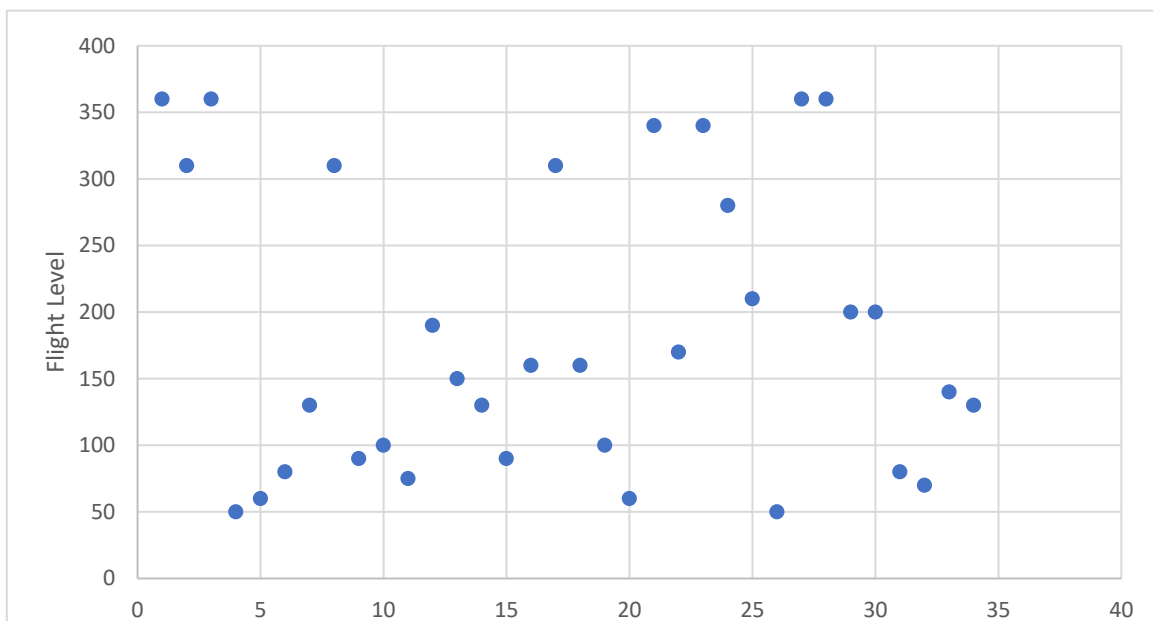
Obr. 14 : Počet incidentov v jednotlivých rokoch

Vzdialenosť stretu lietadiel so sopečným popolom od zdroja sopečnej erupcie je znázornená v tabuľke nižšie. Najčastejšie došlo k stretu lietadla so sopečným popolom vo vzdialenosti medzi 1000 až 2000 km, čo predstavovalo 30 známych incidentov. V 19 prípadoch bola určená vzdialenosť medzi 2000 až 3000 km. Pri 46 incidentoch nebolo možné určiť vzdialenosť z dôvodu nekompletných alebo nepresných dát.

Tab. 8 : Vzdialenosti stretu lietadla od zdroja sopečnej erupcie medzi rokom 2010 až 2014 [36]

Trieda závažnosti	Vzdialenosť stretu lietadla so sopečným popolom od zdroja sopečnej erupcie [km]					
	Neznáma	≤1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	>4000
<b>0</b>	8	2	23	12	8	6
<b>1</b>	26		5	5		
<b>2</b>	11	1				
<b>3</b>	1	1	2	2		
<b>Počet</b>	46	4	30	19	8	6

Cestovná výška prúdových dopravných lietadiel sa pohybuje medzi hodnotami 33000 ft až 43000 ft, čo v prepočte na kilometre predstavuje hranicu medzi 10 km až 13 km. Prúdové dopravné lietadla využívajú vyššie letové hladiny kvôli nižšej spotrebe paliva a lepšej efektívnosti prúdových motorov. Letová hladina, v anglickej terminológii takzvaný flight level, predstavuje výšku 100 ft na jednu letovú hladinu a jeden meter v prepočte na stopy (feet) predstavuje 3,28 stôp. V tabuľke nižšie sú znázornené incidenty v súvislosti s letovou hladinou, kedy k stretu došlo. Znázornených je 34 incidentov, pri ktorých bola zaznamenaná výška letu v čase, kedy došlo k stretu so sopečným popolom. Najčastejšie dochádzalo k incidentom, ktoré súviseli so zmenou letovej hladiny buď počas stúpania alebo klesania. Incidenty v jednotlivých letových hladinách na obrázku č. 15 boli zdokumentované medzi rokom 2010 až 2022.



Obr. 15 : Incidenty v závislosti na letovej hladine

K najvyššiemu počtu incidentov s indexom závažnosti triedy 3 došlo na prúdových lietadlách. Jedným z faktorov by mohol byť fakt, že cestovná rýchlosť prúdových lietadiel je takmer dvojnásobná oproti turbovrtuľovým lietadlám, čo pri zrážke so sopečným popolom môže spôsobiť závažnejšie poškodenia. Častice sopečného popola sú veľmi ostré a spôsobujú abráziu exteriéru lietadla a kľúčovým faktorom pri výsledných poškodeniach je práve rýchlosť letu. Pre lietadlá s piestovým motorom nemusí stret so sopečným popolom zanechať žiadne poškodenia na lietadle kvôli nízkej cestovnej rýchlosti.

Tab. 9 : Počty incidentov v závislosti na type lietadla a triedy závažnosti

Typ lietadla	Trieda závažnosti			
	0	1	2	3
Neznámy typ lietadla	13	10	5	0
Helikoptéry	1	6	1	0
Turbovrtuľové lietadlá	11	4	0	0
Lietadlá s piestovým motorom	4	3	0	0
Prúdové lietadlá	30	13	7	6

## 5.4 Počítačová simulácia sopečnej erupcie

Na základe dát zo štúdie [36] bol vytvorený počítačový model k bližšiemu popisu modelovaných incidentov počas sopečnej erupcie Eyjafjallajökull. Simulácia trvala 4 dni a bola aktualizovaná každých 6 hodín. Letové dáta boli zvolené zo dňa 1.7.2011, pretože v daný deň šlo o najrušnejšiu premávku lietadiel v Európe.

Celkový počet dát pozostával z 33152 letov a bol rozdelený do 4 dní. Počet simulovaných incidentov počas 4 dní je znázornený v tabuľke nižšie.

Tab. 10 : Počet simulovaných incidentov v daný deň [36]

Deň 1	Deň 2	Deň 3	Deň 4
7750	1430	21	73
23,38%	4,31%	0,06%	0,22%



Obr. 16 Polohy stretu lietadla so sopečným popolom v prvý deň simulácie ( vľavo) a druhý deň (vpravo) [36]

Predpovedané polohy stretu lietadla so sopečným popolom sú znázornené v červenej zóne na obrázku č.16 .Zóny sopečného popola sú prezentované v 4D priestore, ktorý je ohraničený zdola a zhora v závislosti na nadmorskú výšku a čas. Stretom lietadla so sopečným popolom sa rozumie bod, v ktorom trajektória lietadla pretne červenú zónu.

Simulácia obsahovala taktiež údaje o predpovedaných fázach letu v dobe, kedy došlo k stretu lietadla so sopečným popolom. Bez ohľadu na tretí deň simulácie došlo k najväčšiemu počtu incidentov počas priblížení a odletov z dôvodu vyššej koncentrácie popola do letovej hladiny 200. Počas štvordňovej simulácie predstavovali incidenty počas priblížení a odletov 75 % z celkových simulovaných incidentov.

Tab. 11 : Počet simulovaných incidentov počas danej fáze letu [36]

	Priblíženie	Stúpanie	Let v hladine	Klesanie	Odlet	Odlet/Priblíženie
Deň 1	2707	940	459	1475	3735	6442
Deň 2	427	263	114	449	482	909
Deň 3	1	8	2	9	1	2
Deň 4	30	19	0	9	43	73

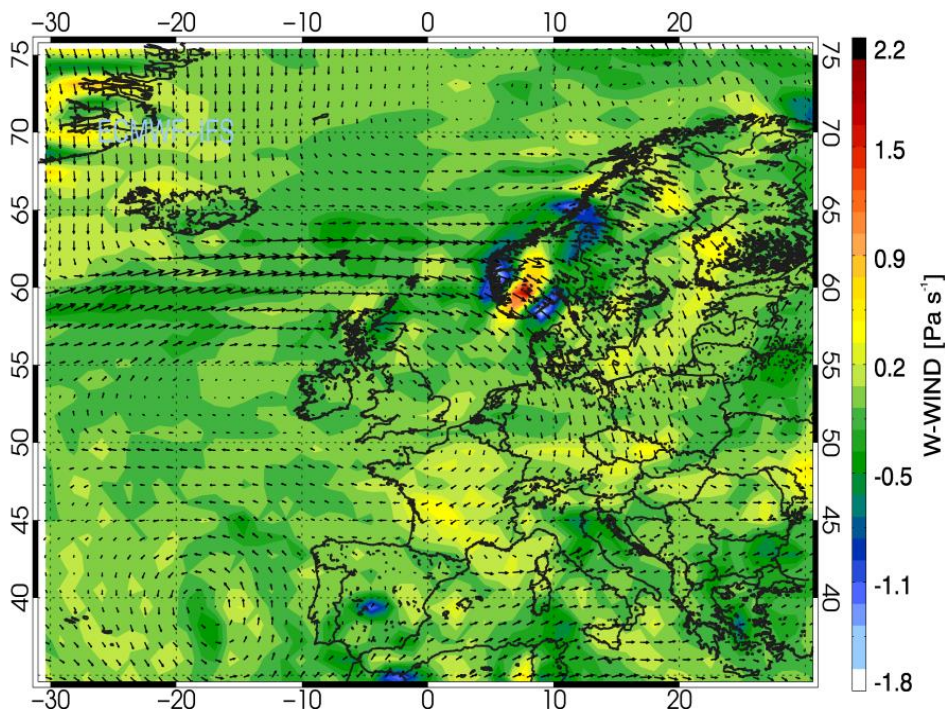
## 5.4.1 Vplyv vetra na prenos sopečných častíc

Rozdielne meteorologické podmienky môžu mať rozdielny vplyv na prenos sopečného popola. Vzďialenosť, ktorú dokáže sopečný popol prejsť v atmosfére, záleží napríklad od veľkosti sopečnej erupcie, veľkosti sopečných častíc alebo od miesta výskytu sopečnej erupcie.

Počas sopečnej erupcie Eyjafjallajökull prevládala vietor zo severu-severovýchodu a vlhkosť vzduchu sa pohybovala medzi 67 až 74 %. Celkové množstvo preneseného sopečného popola sa odhaduje na 11802 kg/m. Priemerná rýchlosť vetra v minútových intervaloch sa pohybovala medzi 14.1 až 22.5 m/s a nárazy vetra sa pohybovali na úrovni 38.7 m/s.

Tab. 12 : Vplyv rýchlosti vetra na množstvo preneseného popola [37]

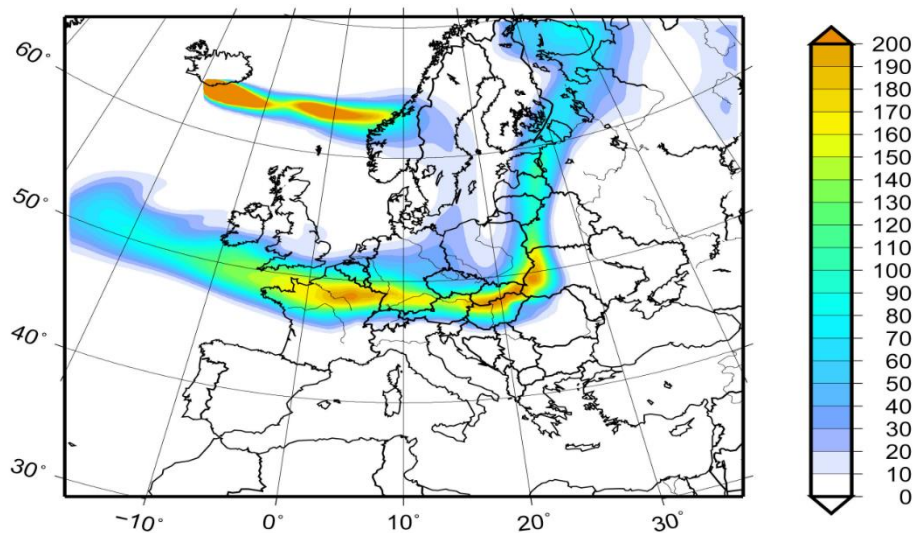
	Rýchlosť vetra [m/s]		Odhadovaný prenos sopečného popola	
	Priemer	Max	Kg * m <sup>-1</sup>	Kg * m <sup>-1</sup> * hod <sup>-1</sup>
1	15,5	21,7	331	442
2	15,3	19,1	61	59
3	17,8	23,8	964	474
4	14,4	21,5	114	46
5	22,5	38,7	9528	1440
6	17,4	24,3	743	232
7	14,1	20,1	59	9



Obr. 17 : Charakteristika vetra počas sopečnej erupcie Eyjafjallajökull [37]

Na obrázku sú šípkami znázornené rýchlosti horizontálneho vetra a vertikálny vietor je znázornený farebne. Údaje boli zaznamenané 17.4.2010 v čase 12:00 UTC a jednalo sa o tlakovú hladinu 500 hpa, čo predstavuje nadmorskú výšku 5500 m.

Na základe počítačovej simulácie bol vytvorený model, ktorý predpovedal pohyb sopečného mraku nad Európou počas sopečnej erupcie Eyjafjallajökull. Predpovedaný pohyb sopečného mraku bol simulovaný vo výške 3500 m a farebné odtiene reprezentujú koncentráciu sopečného popola v  $\mu\text{g m}^{-3}$ .



Obr. 18 : Simulovaný pohyb sopečného mraku nad Európou 17.4.2010 [37]



## Diskusia

Určiť parametre, pri ktorých by mohlo dôjsť k potencionálnemu ohrozeniu vzdušného priestoru Českej republiky je veľmi náročné. K ohrozeniu by mohlo dôjsť počas sopečných erupcií z oblasti Talianska, Azorských a Kanárskych ostrovov a najmä z oblasti Islandu. Hlavným faktorom je vzdialenosť vzdušného priestoru od zdroja sopečnej erupcie a meteorologické podmienky v čase sopečnej aktivity. Z analýzy dát medzi rokmi 2010 až 2014 vyplýva, že až 91 % z celkového počtu známych incidentov, pri ktorých bolo možné určiť vzdialenosť stretnutia lietadla so sopečným popolom, došlo k incidentom do vzdialenosti 4 km od zdroja sopečnej erupcie. Vzdialenosť sopiek na Islande od vzdušného priestoru Českej republiky sa pohybuje medzi 2000 až 3000 km. Počas dostatočnej silnej sopečnej erupcie, kedy výška sopečného stĺpca dosahuje hodnoty  $>9$  km ( $\geq$  VEI 3), môže dôjsť k ovplyvneniu sopečného mraku polárnym jet streamom, a tým pádom by mohlo dôjsť k ohrozeniu vzdušného priestoru v Európe. V prípade sopečnej erupcie o sile VEI 8 by mohlo dôjsť k celosvetovému narušeniu leteckej dopravy, avšak frekvencia týchto erupcií je raz za rádovo 10000 rokov a v modernej dobe nebola zaznamenaná ani raz. Za 69 rokov (1953-2022) z dostupných dát k najväčšiemu počtu incidentov došlo počas sopečnej erupcie o sile VEI 4, čo predstavuje 53 %. Dôvodom je pomerne častý výskyt týchto erupcií, ktoré sa vyskytujú v priemere raz za 10 rokov a množstvo vyvrhnuté materiálu počas sopečnej erupcie.

Z počítačových simulácií bolo možné spozorovať, že aj malé výkyvy v rýchlosti vetra môžu mať veľký vplyv na prenos sopečných častíc atmosférou. Zmena rýchlosti vetra o 7 m/s zapríčinila nárast preneseného popola o viac ako 9000 kg/m.

Kritickou fázou letu z počítačových simulácií predstavoval vzlet a priblíženie, čo predstavovalo 75 % z celkového počtu simulovaných incidentov. Z dôvodu neprítomnosti aktívnej sopky v Českej republike by nedošlo k ovplyvneniu príletov a ani priblížení v českom vzdušnom priestore.

Najčastejšou triedou závažnosti pri strete lietadla so sopečným popolom bola trieda 2. Celkovo trieda 2 tvorí 41 % z celkového počtu incidentov 129 medzi rokmi 1953 až 2010. 23 incidentov bolo klasifikovaných s triedou závažnosti 0, kedy posádka lietadla buď spozorovali sopečný mrak, došlo k tvorbe elektrostatických výbojov alebo letová posádka zaznamenala zápach pripomínajúci síru. Za celú históriu letectva bolo

zdokumentovaných 9 incidentov s triedou závažnosti 4, počas ktorých došlo k dočasnému zlyhaniu aspoň jedného motora a trieda so závažnosťou 5, pri ktorej by došlo k fatálnej havárii, nebola zaznamenaná ani raz.

V prípade kontaminácie vzdušného priestoru Českej republiky vydáva meteorologická služba správu o prítomnosti nebezpečného javu (SIGMET). Počas kontaminácie českého vzdušného priestoru je odporúčané neprevádzkovať lety v kontaminovanom priestore. Na základe rozhodnutia Ministerstva dopravy / Odboru civilného letectva je zriadený krízový štáb, ktorého úlohou je distribúcia informácií a riešenie danej situácie. Hlavnou úlohou v prípade kontaminácie vzdušného priestoru je určenie koncentrácie sopečného popola. V prípade ak koncentrácia sopečného popola prevyšuje povolené hodnoty, mal by byť vyhlásený bezletový stav vo vzdušnom priestore ČR.

K analýze incidentov bola použitá neverejná databáza ECCAIRS, ktorá na vyžiadanie bola sprostredkovaná ústavom pre odborné zisťovanie príčin leteckých nehôd. Databáza obsahovala hlásenia leteckých posádok, ktoré boli nejakým spôsobom ovplyvnené sopečným popolom za letu. Na základe filtrácii dát, zisteniu miesta a dátumu jednotlivých sopečných erupcií a vyhodnotení jednotlivých hlásení boli vytvorené jednotlivé grafy a tabuľky. Z dôvodu, že nebolo možné určiť závažnosť poškodení na lietadle z týchto hlásení, k analýze incidentov medzi rokom 1953 až 2010 bola použitá verejná databáza, ktorej zdroj bude uvedený na konci tohto dokumentu.

## Záver

Za celú históriu letectva nedošlo ani k jednému fatálnemu incidentu, ktorý by zapríčinila prítomnosť sopečného popola v atmosfére no aj napriek tomu predstavuje pre letectvo nebezpečie. Častice popola sa dokážu veľmi ľahko šíriť atmosférou a počas nepriaznivých meteorologických podmienkach, vzdialenosť ktorú dokážu prejsť v atmosfére môže byť na úrovni niekoľkých tisíc km.

Počas stretu lietadla so sopečným popolom môže dôjsť k chybným indikáciám letových prístrojov, poškodeniu na trupe lietadla alebo k zlyhaniu motoru. Vlastnosti sopečného popola nepredstavujú riziko len pre samotné lietadlá ale aj pozemné zariadenia a plochy na letisku.

Včasná detekcia sopečných erupcií a predpoveď pohybu popola v atmosfére môže znížiť počet incidentov v budúcnosti. K skoršej detekcii sopečných erupcií sú využívané pozemné radary, ktoré dokážu určiť veľkosť sopečného mraku a taktiež predpovedať jeho pohyb. K určeniu veľkosti kontaminovaného vzdušného priestoru slúžia satelitné zábery.

Pre letové posádky rozoznať sopečný mrak od bežného meteorologického mraku za nočných letov je priam nemožné a preto je dôležitá včasná distribúcia informácií o výskyte sopečných erupcií zodpovedajúcimi orgánmi.

Česká republika má veľmi vhodnú polohu čo sa týka rozmiestnenia aktívnych sopiek v jej okolí. Ohrozenie českého vzdušného priestoru sopečným popolom nepredstavuje vysoké riziko avšak pri výskyte silných erupcií s indexom  $\geq$ VEI 4 sa riziko zvyšuje. Na základe analýzy jednotlivých incidentov bola sila erupcie s indexom VEI 4 určená ako potenciálna hrozba pre česky vzdušný priestor. So zvyšujúcou sa vzdialenosťou od zdroja sopečnej aktivity toto riziko klesá.

## Citácie

- [1] PRATA, Fred a Bill ROSE. Volcanic Ash Hazards to Aviation. In: *The Encyclopedia of Volcanoes* [online]. Elsevier, 2015, 2015, s. 7-8 [cit. 2022-03-05]. ISBN 9780123859389. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-385938-9.00052-3
- [2] PRATA, Fred a Bill ROSE. Volcanic Ash Hazards to Aviation. In: *The Encyclopedia of Volcanoes* [online]. Elsevier, 2015, 2015, s. 38 [cit. 2022-03-05]. ISBN 9780123859389. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-385938-9.00052-3
- [3] E. E. Campbell, “Recommended Flight-Crew Procedures if Volcanic Ash is Encountered”, Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, 1991, U.S. Geological Survey Bulletin 2047 (1994), s. 153.
- [4] International Civil Aviation Organization. *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds: Doc 9691 AN/954* [online]. 2007, s. 63-66,[cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2997.pdf>
- [5] Simona Day, Carina FEARNLEY, Spethen EDWARDS a Christopher KILBURN. *Volcanic Hazard from Iceland: Analysis and Implications of the Eyjafjallajökull Eruption* [online]. 2010, s.11 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/308319601\\_Volcanic\\_Hazard\\_from\\_Iceland\\_analysis\\_and\\_implications\\_of\\_the\\_Eyjafjallajokull\\_eruption](https://www.researchgate.net/publication/308319601_Volcanic_Hazard_from_Iceland_analysis_and_implications_of_the_Eyjafjallajokull_eruption)
- [6] International Civil Aviation Organization. *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds: Doc 9691 AN/954* [online]. 2007, s. 70-73,[cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2997.pdf>
- [7] International Civil Aviation Organization. *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds: Doc 9691 AN/954* [online]. 2007, s. 72,[cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2997.pdf>
- [8] GUFFANTI, Marianne, Gari C. MAYBERRY, Thomas J. CASADEVALL a Richard WUNDERMAN. Volcanic hazards to airports. *Natural Hazards* [online]. 2009, s. 291-294 [cit. 2022-05-03]. ISSN 0921-030X. Dostupné z: doi:10.1007/s11069-008-9254-2
- [9] Stevenson, J.A.; Millington, S.C.; Beckett, F.M.; Swindles, G.T.; Thordarson, T. Big grains go far: Understanding the discrepancy between tephrochronology and satellite infrared measurements of volcanic ash. *Atmos. Meas. Tech.* 2015, 8, 2069–2091.
- [10] W.I. Rose and A.B. Kostinski, “Radar Remote Sensing of Volcanic Clouds”, Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, 1991, U.S. Geological Survey Bulletin 2047 (1994), s. 391.
- [11] International Civil Aviation Organization. *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds: Doc 9691 AN/954* [online]. 2007, s. 43,[cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2997.pdf>

- [12] HELIA, Petr. *Využívání kmitočtových pásem VKV, UKV, SKV a EKV v radarech civilního i vojenského využití* [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/40097>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Letecký ústav. Vedoucí práce Slavomír Vosecký.
- [13] GUFFANTI, Marianne, Gari C. MAYBERRY, Thomas J. CASADEVALL a Richard WUNDERMAN. Volcanic hazards to airports. *Natural Hazards* [online]. 2009, 287-302 [cit. 2022-05-27]. ISSN 0921-030X. Dostupné z: doi:10.1007/s11069-008-9254-2
- [14] Hoblitt RP, Quaas Weppen R (1999) Doppler radar as a volcano monitoring tool. In: Abstracts of the international symposium on Popocatepetl volcano, Mexico City, 22–24 March 1999, s.19
- [15] GUFFANTI, Marianne, Gari C. MAYBERRY, Thomas J. CASADEVALL a Richard WUNDERMAN. Volcanic hazards to airports. *Natural Hazards* [online]. 2009, 287-302 [cit. 2022-05-27]. ISSN 0921-030X. Dostupné z: doi:10.1007/s11069-008-9254-2
- [16] S. MARZANO, Frank, D. CIMINI a Mario MONTOPOLI. *Microwave radar remote sensing of volcanic ash clouds for aviation hazard and civil protection applications: the 2011 Grímsvötn eruption case study* [online]. 2012, 2-6 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/258834372\\_Microwave\\_radar\\_remote\\_sensing\\_of\\_volcanic\\_ash\\_clouds\\_for\\_aviation\\_hazard\\_and\\_civil\\_protection\\_applications\\_the\\_2011\\_Grimsvotn\\_eruption\\_case\\_study](https://www.researchgate.net/publication/258834372_Microwave_radar_remote_sensing_of_volcanic_ash_clouds_for_aviation_hazard_and_civil_protection_applications_the_2011_Grimsvotn_eruption_case_study)
- [17] KROTKOV, N. A., O. TORRES, C. SEFTOR, et al. Comparison of TOMS and AVHRR volcanic ash retrievals from the August 1992 eruption of Mt. Spurr. *Geophysical Research Letters* [online]. 1999, s.455-458 [cit. 2022-05-27]. ISSN 00948276. Dostupné z: doi:10.1029/1998GL900278
- [18] Rose, W. I., and D. J. Schneider, Satellite images offer aircraft protection from volcanic ash clouds, *EOS*, 77, s.529-532, 1996
- [19] Krueger A.J., L.S.Walter, P.K.Bhartia, C.C.Schnetzler, N.A.Krotkov, I.Sprod, and G.J.S.Bluth, Volcanic sulfur dioxide measurements from the Total ozone Mapping Spectrometer (TOMS) instruments, *Geophys. Res.*, 100,14057-14076, 1995
- [20] International Civil Aviation Organization. *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds: Doc 9691 AN/954* [online]. 2007, s. 44-62,[cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2997.pdf>
- [21] ULFARSSON, Gudmundur Freyr a Elizabeth A. UNGER. Impacts and Responses of Icelandic Aviation to the 2010 Eyjafjallajökull Volcanic Eruption. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 2011, 144-151 [cit. 2022-06-01]. ISSN 0361-1981. Dostupné z: doi:10.3141/2214-18
- [22] GRANČAY, M.: Sopečná kríza z apríla 2010 –dopady a poučenia do budúcnosti.Bratislava : VydavateľstvoEKONÓM,2010. -ISBN 978-80-225-3034-7. s. 86-95

- [23] International Civil Aviation Organization. ICAO ERU/NAT Volcanic Ash Task Force Takes Steps to Minimize Disruptions to Air Transport Operations, Montreal, Quebec, Canada, 2010. <http://www.paris.icao.int/news/20100513vatf.htm>. Accessed May 30, 2010
- [24] International Air Transport Association. Volcano Crisis Cost Airlines \$1.7 Billion in Revenue—IATA Urges Measures to Mitigate Impact, Montreal, Quebec, Canada, 2010. <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2010-04-21-01.aspx>. Accessed May 30, 2010
- [25] EU Disagrees with Airlines' Criticism over Airspace Closure. EUBusiness, April 19, 2010. <http://www.eubusiness.com/news-eu/iceland-volcano.478>. Accessed July 11, 2010
- [26] O. Pálsson, T. Conference Summary and Conclusions. In Atlantic Conference on Eyjafjallajökull and Aviation, Sept. 15–16, Keilir Aviation Academy, Keflavik, Iceland, 2010. [http://en.keilir.net/static/files/Aviation/PDF/Summary\\_Keilir\\_Aviation%20Conference.pdf](http://en.keilir.net/static/files/Aviation/PDF/Summary_Keilir_Aviation%20Conference.pdf). Accessed 12, 2010.
- [27] *Postupy ČR v případě výskytu nebo očekávaného výskytu vulkanického popela ve vzdušném prostoru ČR.: Směrnice CAA/S-SLS-024-n/2013*. In: . Praha: Úřad pro civilní letectví, 2018.
- [28] *SIGMET QUICK REFERENCE GUIDE WV SIGMET* [online]. 2016 [cit. 2022-06-07]. Dostupné z: <https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/WV-SIGMET.pdf>
- [29] *Slovenský hydrometeorologický ústav: Letecká výstražná informácia SIGMET* [online]. 2022, 2016 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: [https://w5.shmu.sk/sk/?page=1&id=meteo\\_lms\\_sigmet](https://w5.shmu.sk/sk/?page=1&id=meteo_lms_sigmet)
- [30] ] International Civil Aviation Organization. *Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds: Doc 9691 AN/954* [online]. 2007, s. 87-99,[cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2997.pdf>
- [31] SOUKOP, R. Vliv vulkanického popela na leteckou dopravu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 108 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Chlebek, Ph.D..
- [32] NEWHALL, Christopher G. a Stephen SELF. The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1982, [cit. 2022-05-07]. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/JC087iC02p01231
- [33] WHELLEY, Patrick L., Christopher G. NEWHALL a Kyle E. BRADLEY. The frequency of explosive volcanic eruptions in Southeast Asia. *Bulletin of Volcanology* [online]. 2015, **77**(1) [cit. 2022-05-07]. ISSN 0258-8900. Dostupné z: doi:10.1007/s00445-014-0893-8
- [34] SOUKOP, R. Vliv vulkanického popela na leteckou dopravu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 108 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Chlebek, Ph.D..

- [35] Guffanti, Marianne, Casadevall, T.J., and Budding, Karin, 2010, Encounters of aircraft with volcanic ash clouds; A compilation of known incidents, 1953–2009: U.S. Geological Survey Data Series 545, ver. 1.0, 12 p., plus 4 appendixes including the compilation database, available only at <http://pubs.usgs.gov/ds/545>
- [36] C. CHRISTMANN a R. R. NUNES. *RECENT ENCOUNTERS OF AIRCRAFT WITH VOLCANIC ASH CLOUDS: German Aerospace Center* [online]. Germany, 2015, 1-10 [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <https://www.dglr.de/publikationen/2015/370124.pdf>
- [37] EMEIS, S., R. FORKEL, W. JUNKERMANN, et al. Measurement and simulation of the 16/17 April 2010 Eyjafjallajökull volcanic ash layer dispersion in the northern Alpine region. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2011, 2689-2701 [cit. 2022-08-01]. ISSN 1680-7324. Dostupné z: doi:10.5194/acp-11-2689-2011
- [38] ICAO. *Flight Safety and Volcanic Ash: Risk management of flight operations with known or forecast volcanic ash contamination Doc (9974)* [online]. 2012. [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: [https://www.icao.int/publications/Documents/9974\\_en.pdf](https://www.icao.int/publications/Documents/9974_en.pdf)
- [39] Databáza k analýze incidentov medzi rokom 1953-2010 dostupná z ([USGS Data Series 545: Encounters of Aircraft with Volcanic Ash Clouds: A Compilation of Known Incidents, 1953–2009](#))

