

Vorwissenschaftliche Arbeit

Die Eruption des Eyjafjallajökull im April 2010 und ihre Auswirkungen auf den Luftverkehr in Europa

vorgelegt von

Nicholas McLaren 6B 2019/20

Betreuerin: Prof. Mag. Eva-Maria Korn

Prag, April 2020

Abstract

Die Eruption des Eyjafjallajökull im April bzw. Mai 2010 verursachte eine erhebliche Krise in der europäischen Luftfahrt. Zwischen dem 15. und 22. April sind mehr als 104.000 Flüge abgesagt worden, was sich auf circa 10 Millionen Reisenden ausgewirkt hat. Das Ziel dieser Arbeit ist zu untersuchen, wie es zu einer nahezu totalen Sperre des Luftraums über Europa gekommen ist.

Zuerst wird erklärt, welche negativen Auswirkungen Vulkanasche auf ein Flugzeug haben kann, weiterhin wird die Eruption im Frühjahr 2010 beschrieben, es werden die Bewegungen der Aschenwolke beobachtet und die Reichweite der Sperren gezeigt. Zum Schluss wird der Beitrag zur heutigen Luftfahrtsicherheit diskutiert, inklusive der Erstellung von Grenzwerten. Als Zusatz werden Statistiken zu den Sperren analysiert.

Die Arbeit liefert die Erkenntnis, dass eine Luftraumsperre solcher Magnitude nicht unbedingt nötig war und dass es mit den revidierten Grenzwerten damals kaum Flugverbote gegeben hätte.

Vorwort

Besonders will ich mich bei Prof. Mag. Eva-Maria Korn bedanken, unter deren aufmerksamen Auge diese Arbeit verfasst wurde.

INHALTSVERZEICHNIS

ABSTRACT	2
VORWORT	3
1 EINLEITUNG	6
2 VULKANASCHEN UND IHRE GEFAHREN FÜR FLUGZEUGE	7
2.1 Auswirkung von Vulkanasche auf Triebwerke	8
2.2 Andere Risiken	10
2.3 Einzelvorfälle vor 2010.....	11
2.4 British Airways Flug BA9.....	12
3 AUSBRUCH DES EYJAFJALLAJÖKULL 2010 UND DIE SPERRE DES LUFTRAUMS IN EUROPA	15
3.1 Verlauf der Eruptionen.....	16
3.1.1 Vorphase	16
3.1.2 Erste explosive Phase	16
3.1.3 Zweite explosive Phase.....	18
3.2 Ausstoß.....	18
3.2.1 Menge	18
3.2.2 Eigenschaften.....	19
3.3 Bewegungen der Aschewolke und die Sperre des Luftraums.....	20
3.3.1 Meteorologische Voraussetzungen	20
3.3.2 Zeitachse der Sperren	21
4 KONSEQUENZEN DER FORSCHUNGSERGEBNISSE FÜR DIE AKTUELLE LUFTFAHRT	26
4.1 Einrichtung von Grenzwerten.....	28
4.1.1 Grenzwerte vor dem 20. April 2010	28
4.1.2 Grenzwerte ab dem 20. April 2010	29
4.1.3 Revidierte Grenzwerte ab dem 17. Mai 2010	30

5	ÜBERSICHT ÜBER DAS STATISTISCHE MATERIAL VON EUROCONTROL UND DEREN AUSWERTUNG	34
5.1	Methoden der Datenauswertung.....	34
5.2	Annullierungen.....	35
5.3	Verspätungen	37
5.4	Auswirkungen auf Tschechien und Österreich.....	38
6	RESÜMEE	40
7	LITERATURVERZEICHNIS	41
7.1	Sekundärliteratur	41
7.2	Beiträge in wissenschaftlichen Zeitschriften	41
7.3	Berichte und Verordnungen	43
7.4	Lexika und Online-Lexika.....	44
7.5	Zeitungen.....	45
7.6	Visuelle Quellen.....	45
7.7	Online-Quellen.....	45
7.8	Bilder.....	46
8	TABELLEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS	49
	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	51

1 Einleitung

Der Luftraum über Europa wird jedes Jahr zunehmend mehr belastet, wir sind abhängig von der Mobilität, die uns der Luftverkehr anbietet, ganz zu schweigen von der Nahrungslogistik und anderen Bereichen, die mit dem Luftverkehr eng verbunden sind. Es geht um ein komplexes System, das leicht zusammenbrechen kann, wie in 2010, als der isländische Vulkan Eyjafjallajökull eruptierte.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Eruption im Frühjahr 2010 und deren Auswirkungen auf den Luftverkehr in Europa. Das Hauptziel dieser Arbeit war herauszufinden, welche Risiken Vulkanasche für Flugzeuge überhaupt darstellt, wie die entstandene Aschenwolke zum Sperren des europäischen Luftraums führte und welche Konsequenzen es aus den damaligen Erfahrungen gibt, die sich auf die heutige Luftfahrt auswirken. Im Rahmen dieser Arbeit konnte die Auswirkung auf die Ökonomie *nicht* angesprochen werden.

Die Arbeit ist in vier Kapitel aufgeteilt. Das erste Kapitel schafft einen detaillierten Überblick über Vulkanasche, Aschewolken und ihren Einfluss auf die Funktionalität verschiedenster Teile eines modernen Flugzeugs. Das zweite Kapitel beschreibt die Eruptionen des Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010, ihren Verlauf mit Schwerpunkt auf deren vulkanischen Ausstoß, Bewegungen der entstandenen Aschenwolke und die damit verbundenen Sperren des europäischen Luftraums. Das dritte Kapitel erörtert die Entscheidungen der Behörden im April 2010 und beschreibt die Entstehung von Grenzwerten für Asche in der Atmosphäre. Zum Schluss werden Statistiken aus Daten von EUROCONTROL beschrieben, aus eigenem Interesse werden Statistiken von Tschechien und Österreich detailliert interpretiert.

Bei der Verfassung wurde mit mehreren Quellen gearbeitet, hauptsächlich mit Fachliteratur und Ergebnissen von Forschungen, die verschiedene Aspekte untersucht haben. Außerdem wurden zeitgemäße Karten des UK Met Office angewendet, Statistiken und Daten von EUROCONTROL analysiert.

2 Vulkanasche und ihre Gefahren für Flugzeuge

Vulkanasche wird als „vulkanisches Gestein [...], das bei explosiven Vulkanausbrüchen entsteht und weit verfrachtet werden kann“¹ definiert.² Bei heftigen Eruptionen kommt es zum Zerreißen des Magmas in feine Partikel, die verschieden groß sein können, etwa in der Größe von Sandkörnern bis Feinstaub.³ Diese Asche und anderer vulkanischer Ausstoß, hauptsächlich SO₂-Gas, können hoch in die Atmosphäre gelangen, wobei die Eruptionssäule alle Flughöhen durchkreuzt und die Tropopause erreicht. Die Reiseflughöhe von Verkehrsflugzeugen liegt oft knapp unter der Tropopause.⁴

Wie lange der vulkanische Ausstoß in der Atmosphäre bleibt, hängt von der Höhe ab, die er erstens erreicht hat. Vulkanische Aerosole können in der Stratosphäre eine Lebensdauer sogar von ein paar Jahren haben. In den niedrigsten Schichten wird aber Asche und SO₂ innerhalb von Stunden durch atmosphärische Vorgänge, wie zB. durch den Rainout, entfernt.⁵

Deshalb stellt nur ein Bruchteil der eruptierten Masse, meistens nur ein paar Prozent, eine Gefahr für die Luftfahrt dar. Es handelt sich um sehr winzige Teilchen im Größenbereich von 1 bis 30 µm, die aber leicht vom Wind verbreitet werden können und daher die Flugstrecken kontaminieren können.⁶ Vulkanasche ist scharfkantig, hart und besitzt abrasive Eigenschaften. Wenn ein Flugzeug eine Aschenwolke kreuzt, arbeiten diese Teilchen wie ein Schleifmittel und schaden der äußeren Oberfläche des Flugwerks. Außerdem dringen diese Teilchen in die Triebwerke ein und weil sie eine

¹ VOLCANODISCOVERY, o. J.

² vgl. DELIGNE & SIGURDSSON, 2015, S. 256

³ vgl. SZEGLAT, o. J.

⁴ vgl. PRATA & ROSE, 2015, S. 912

⁵ vgl. ebd.

⁶ vgl. ebd. S. 913f

niedrigere Glasübergangstemperatur als die Betriebstemperatur der Triebwerke besitzen, verursachen sie Triebwerksausfälle.⁷

2.1 Auswirkung von Vulkanasche auf Triebwerke

Eine Begegnung des Flugzeugs mit einer Aschenwolke bedeutet eine Bedrohung besonders für die eigenen Triebwerke. Bei modernen Turbinen-Strahltriebwerken, die heute häufig verwendet werden, liegt die Turbineneintrittstemperatur meistens über 1.200°C , wobei die Glasübergangstemperatur von silikatreichen Ascheteilchen zwischen 700°C und 1.100°C liegt.⁸ Beim Flug durch eine mit Vulkanasche kontaminierte Umgebung werden diese Teilchen in die Triebwerke eingesaugt und gelangen somit in die Brennkammer.⁹

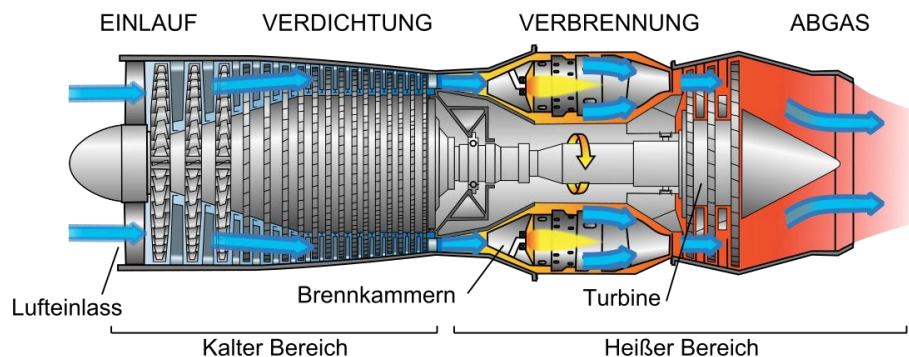


Abbildung 1: Grundsätzlicher Aufbau eines Strahltriebwerks (Dahl, 2016)

In der Brennkammer schmelzen die Teilchen, bilden ein plastisches Material, das heiß und klebrig ist. Dieses bildet Schichten auf den Metallelementen des Triebwerks und kann Entlüftungsöffnungen verstopfen.¹⁰ Die Ablagerung einer kohlenstoffartigen Masse auf den Kraftstoffeinspritzdüsen wurde auch häufig beschrieben.¹¹

⁷ vgl. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2012, S. 13

⁸ vgl. PRATA & ROSE, 2015, S. 914

⁹ vgl. U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2015

¹⁰ vgl. PRATA & ROSE, 2015, S. 914

¹¹ vgl. DUNN, 2012, S. 3

Die Akkumulation von Material auf den Leitschaufeln, das sind Metallflächen, die die Luft möglichst effizient in den Kompressor leiten, bewirkt eine schnelle Steigerung des statischen Brennerdrucks. In manchen Fällen, hauptsächlich bei größeren Flughöhen, kann dies zum Pumpen des Kompressors führen. Pumpen heißt, dass die komprimierte Luft im Triebwerk zyklisch einströmt und rückströmt, was von heftigen Vibrationen begleitet wird und schließlich eine Abschaltung des Triebwerks verursachen kann.^{12 13}



Abbildung 2: Akkumulation vom Material auf den Leitschaufeln (Moody, 1982)

Solche Ablagerungen können wegen ihrer Sprödigkeit bei niedrigeren Temperaturen abgebaut und abgebrochen werden, sobald die Innentemperatur des Triebwerks sinkt, wie zum Beispiel im Leerlauf. Die Strömung des Fahrtwindes bewirkt dann eine Abtragung des Materials. Aufgrund dessen ist meistens das Wiederanlassen im Flug möglich.¹⁴

¹² vgl. CASADEVALL, 1994, S.110

¹³ vgl. KMO TURBO GMBH, o. J.

¹⁴ vgl. CASADEVALL, 1994, S. 110f

Grundsätzlich sind folgende Auswirkungen bei Kontamination mit Vulkanasche im Triebwerk zu beobachten. Konsequenzen der Asche im Triebwerk:

- Erosion der Turbinen-Kompressorschaufeln und die Reduktion ihrer Leistungsfähigkeit
- Verstopfung der Luftfilter
- Blockierung der Kraftstoffdüsen
- Bildung eines Überzugs und eine damit verbundene Isolation der Temperatursensoren des Kraftstoffsystems, was falsche Messwerte verursacht
- Kontamination der Ölversorgungsanlage
- Überzug wichtiger Triebwerkteile durch eine glasartige Beschichtung aus geschmolzener Asche ¹⁵

2.2 Andere Risiken

Vulkanische Asche gefährdet wegen ihrer Härte auch andere Teile des Flugwerks. Windschutzscheiben sind besonders empfindlich gegenüber dem Zerkratzen, das die Durchsichtigkeit des Acryls verringert und damit auch die Sicht des Piloten beeinträchtigt. ¹⁶

Eine deutliche Menge an Ascheteilchen in der Größenordnung von circa 6 µm gelangt in das Umgebungskontrollsystem und kann entweder den Zapluftfilter verstopfen oder direkt in die Kabine eindringen. Zapluft ist die komprimierte, nichtkontaminierte Luft aus den Triebwerken, die für die Sauerstoffversorgung und den Druckausgleich in der Kabine geeignet ist. Eine Verstopfung des Zapluftfilters kann Kabinendruckverlust verursachen. ¹⁷

Schwefeldioxid und Chlor, die in einer Aschenwolke häufig auftreten, bilden außerdem in Verbindung mit Wasser Säuren, nämlich Schwefelsäure bzw. Salzsäure, welche

¹⁵ vgl. U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2015

¹⁶ vgl. CASADEVALL, 1994, S. 144

¹⁷ vgl. ebd. S. 113

korrodierend auf verschiedene Teile des Flugzeugs wirken und gesundheitsgefährdend sind.¹⁸

Zu weiteren entdeckten Risiken zählen Kurzschlüsse in elektronischen Systemen sowie ihr Ausfall und die Verstopfung der Pitotschen Röhren, also Messgeräten, die außen am Flugzeug in Flugrichtung befestigt sind und für die Messung der Flugeschwindigkeit verantwortlich sind.¹⁹

2.3 Einzelvorfälle vor 2010

In der Vergangenheit kam es öfter zu Begegnungen von Flugzeugen mit Aschenwolken. Im Zeitraum zwischen 1953 und 2010 gab es 129 Fälle, wo eine Begegnung mit vulkanischem Ausstoß zumindest vermutet wird. Der Ausstoß, der diese Begegnungen verursacht hat, stammte von 38 verschiedenen Vulkanen. 8 von diesen Vulkanen waren zumindest für 5 Begegnungen verantwortlich, sie sind in Abbildung 3 angedeutet.



Abbildung 3: Sich auf die Luftfahrt oft auswirkende Vulkane 1953-2010 (McLaren, 2019)

¹⁸ vgl. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2012, S. 13

¹⁹ vgl. PRATA & ROSE, 2015, S. 914

79 Begegnungen wurden als „schädigend“ bezeichnet und bei 26 Fällen kam es zu schwerwiegendem Schaden, unter anderem zu Triebwerkausfällen, die aber nur ein Wiederanlassen im Flug benötigten. Trotzdem bewirkte Vulkanasche bis heute keine Schäden, die einen Absturz eines Flugzeugs verursacht hätten.²⁰

Von den Vorfällen wird folgender am häufigsten beschrieben und wird als Paradebeispiel genannt:

2.4 British Airways Flug BA9

Am späten Abend des 24. Juni 1982 eruptierte der indonesische Schichtvulkan Galunggung auf Java, wobei er eine riesige Aschewolke über Java und dem Meer südlich von Jakarta erzeugte. Es wird vermutet, dass bei der heftigen Eruption 430 kt Schwefeldioxid bis in 14 km Höhe ausgespien worden sind, trotzdem wurde kein Warnhinweis für die Luftfahrt ausgerufen.²¹



Abbildung 4: Route von BA9, Galunggung eingezeichnet (Diamond, 1986)

Schließlich befand sich diese Aschewolke, die sich sogar in ein Eruptionsgewitter entwickelte, in der Flugstrecke einer Boeing 747-200 der Luftfahrtgesellschaft British Airways. Das Flugzeug der Registration G-BDXH auf der Strecke London-Perth mit

²⁰ vgl. GUFFANTI, CASADEVALL & BUDDING, 2010, S. 8

²¹ vgl. GLOBAL VOLCANISM PROGRAM, 2013

274 Fahrgäste und 91.000 kg Treibstoff an Bord erreichte die Aschewolke in Reiseflughöhe von 37.000 Fuß, also ungefähr 11,3 km, kurz nach einem Zwischenstopp in Jakarta.²²

Die Flugbesatzung, geleitet vom 51-jährigen Kapitän Eric Moody, erfasste zuerst nur das sogenannte Elmsfeuer, also eine „büschelförmige elektrische Gasentladung an herausragenden, spitzen Gegenständen“²³. Es zeigte sich als leuchtende, blau-weiße Funken hinter der Windscheiben. Verursacht wurde dies durch scharfkantigen Ascheteilchen, die an der Vorderseite des Flugzeugs aufprallten.

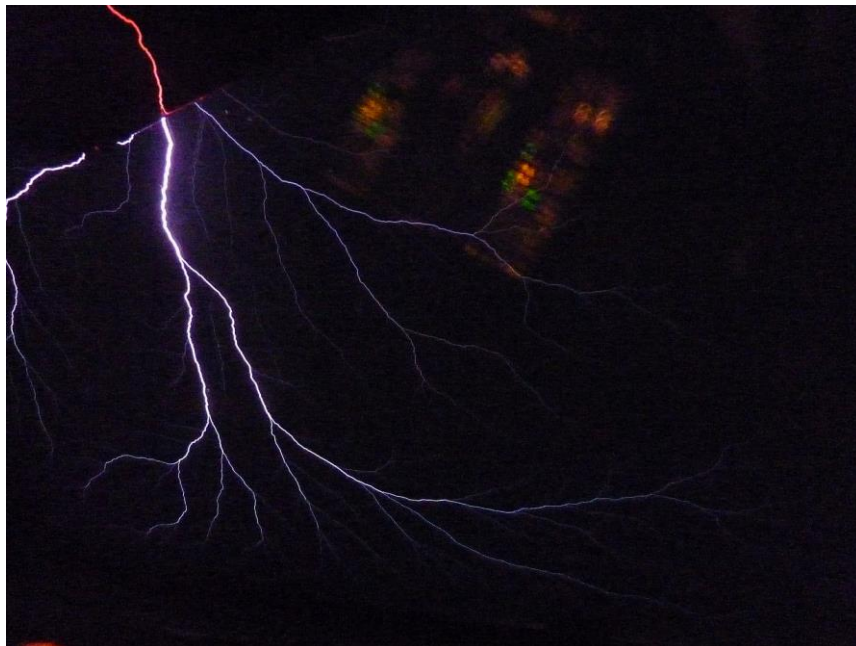


Abbildung 5: Lichtblitz eines Elmsfeuers auf der Frontscheibe des Cockpits eines Airbus (Peschke, 2011)

Weiterhin erkannten die Piloten ein viel dringenderes Problem, und zwar das Versagen von allen 4 Triebwerken. Die Ablagerung von Aschepartikeln führte zum Pumpen, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, und alle 4 Triebwerke setzten aus. Die Flugbesatzung traf die Entscheidung, langsam zu sinken, solange die Funktionalität der Triebwerke

²² vgl. DIAMOND, 1986, S. 13

²³ EDITOREN DER BROCKHAUS ENZYKLOPÄDIE ONLINE, 2019

beeinträchtigt war. Bei 12.000 Fuß war ein Wiederanlassen aller 4 Triebwerke möglich, aufgrund der niedrigeren Temperatur und anschließendem Abbau der kohlenstoffartigen Aschesubstanz. Siehe Kapitel 2.1.

Ein weiterer Aufstieg, unbewusst in die Aschenwolke, bewirkte eine definitive Abschaltung des Triebwerks Nr. 2. Vor der Abschaltung erzeugte das Triebwerk auch heftige Vibrationen. Bis dahin wurde schon das Flugzeug zurück in Richtung Jakarta gesteuert, wo es einige Minuten später gelandet ist.

Diese Begegnung wurde von den Piloten nicht als eine Aschenbegegnung erkannt, verursachte aber riesige Schäden am Flugzeug. Fast alle Beschädigungen, die in Kapitel 2 beschrieben werden, wurden nach einer sicheren Notlandung in Jakarta und während einer Ermittlung beobachtet. Unter den wichtigsten Schäden zählt die irreparable Zerstörung der Turbinenschaufeln sowie der anderen Teile im Inneren des Triebwerks, was die vorher erwähnten Triebwerksausfälle verursacht hat. Dazu kommen auch die Reibung und das Zerkratzen von Acrylglas. Die Cockpitscheiben sind opak und undurchsichtig geworden und haben die Sicht der Piloten komplett verhindert.²⁴

²⁵

²⁴ vgl. STEWART, 2002, S. 202

²⁵ vgl. DIAMOND, 1986

3 Ausbruch des Eyjafjallajökull 2010 und die Sperre des Luftraums in Europa

Der 1651 Meter hohe Eyjafjalla-Vulkan liegt im Südwesten Islands, eine Serie von Eruptionen im April bzw. im Mai 2010 wirkte sich dramatisch auf den Flugverkehr in Europa aus. Der Luftraum über einem großen Teil Europas wurde wegen der Aschenwolke aus Sicherheitsgründen für mehrere Tage gesperrt.

Wie bei dem indonesischen Galunggung (siehe Kapitel 2.4) handelt es sich beim Eyjafjallajökull um einen Schichtvulkan, also um einen Vulkan, der im Laufe der Zeit von mehreren Schichten Lava und pyroklastischen Ablagerungen gebildet wurde. Solche Vulkane zählen zu den gefährlichsten aufgrund ihrer charakteristischen plinianischen Eruptionen. Ascheteilchen dieser Ausbrüche können bis in 40 km Höhe gelangen, was besonders die Luftfahrt beeinträchtigt. Außerdem können solche Vulkane bei diesen Eruptionen bis zu mehreren Kubikkilometern Material ausspeien.^{26 27}

Aufgezeichnet sind Eruptionen in den Jahren 920, 1612 oder 1613, 1821-23. Die letzte genannte dauerte annähernd 14 Monate. In allen drei Fällen war eine Eruption begleitet oder gefolgt von einer Eruption des größeren Vulkans Katla, der sich 25 km östlich vom Eyjafjallajökull befindet. Im Fall einer Eruption Katlas wären die Folgen viel destruktiver gewesen, manche Wissenschaftler sprechen sogar von einer Abkühlung des Klimas durch die Ascheverladung in der Atmosphäre. Trotz der Befürchtung von Seiten der Fachleute war dies aber bei den Eruptionen 2010 nicht der Fall, es ist zu keiner Eruption der Katla gekommen.^{28 29}

²⁶ vgl. GLOBAL VOLCANISM PROGRAM, 2013b

²⁷ vgl. KASPAR, O. J.

²⁸ vgl. KOŘEN, 2010

²⁹ vgl. RAFFERTY, 2017

3.1 Verlauf der Eruptionen

3.1.1 Vorphase

Die erhöhte seismische Aktivität in der Umgebung begann mit kleinen Clustern von schwachen Erdbeben im Januar 2010 und kulminierte am Abend des 20. März 2010 mit einer effusiven Eruption am Fimmvörðuhálspass.³⁰ Die Bezeichnung „Effusiv“ gilt für nichtexplosive Eruptionen, wo Magma relativ ruhig aus dem Förderschlot austritt und kaum Asche ausgespien wird.³¹



Abbildung 6: Die effusive Eruption im Fimmvörðuhálspass (Hunt, 2010)

Diese vulkanische Aktivität dauerte fast 3 Wochen, bevor sie am 12. April zum Stillstand gekommen ist.³²

3.1.2 Erste explosive Phase

Die zweite Eruption, am Gipfel des Vulkans, war für die Luftfahrt entscheidend. Am 14. April 2010 erfolgte die Eruption unter einem Gebiet bedeckt mit einer 200 m dicken Gletschereisschicht und erzeugte eine Eruptionssäule, die 9.000-10.000 m erreichte

³⁰ vgl. SIGMUNDSSON u. a., 2010, S. 426

³¹ vgl. SZEGLAT, o. J.

³² vgl. GLOBAL VOLCANISM PROGRAM, 2013b

und sich in einem starken Westwind befand, der die Aschewolke in Richtung Europa trieb.^{33 34}

Während der Eruption wurden Teile des Gletschers aufgeschmolzen und es sind folglich 3 charakteristische Kessel entstanden.³⁵ Die Eis-Magma Wechselwirkung bewirkte eine phreatomagmatische Explosion, welche für eine wasserdampfreiche Eruptionssäule verantwortlich war.



Abbildung 7: Aschen- und Dampfreiche Eruptionssäule am 17. April (Fridriksson, 2010)

„Bei phreatomagmatischen Eruptionen spielt neben den magmatischen Eruptionsprozessen externes Wasser eine Rolle. Beispielsweise kann an einer Störung aufsteigendes Magma in einigen Zehner bis Hunderten Meter Tiefe in engen Kontakt mit Grundwasser geraten. Die hieraus resultierenden Explosionen führen zu Druckwellen, die sich mit großer Geschwindigkeit in der Schmelze fortpflanzen. Dadurch wird die Schmelze fragmentiert. [...] Durch die heftigen Dampfexplosionen findet eine starke Fragmentierung des Magmas und oft auch des Nebengesteins statt.“³⁶

Aufgrund der oben erwähnten Fragmentation war die Asche besonders fein und dadurch für den Luftverkehr gefährlich.³⁷ Siehe Kapitel 2. Diese erste explosive Phase dauerte bis zum 17. April 2010.

³³ vgl. GYLFASSON u. a., 2012, S. 68

³⁴ vgl. PRATA, KRISTIANSEN, THOMAS & STOHL, 2018, S. 5470

³⁵ vgl. GUDMUNDSSON u. a., 2012, S. 3

³⁶ MARTIN u. a., 2000

³⁷ vgl. GYLFASSON u. a., 2012, S. 68

3.1.3 Zweite explosive Phase

Zwischen dem 18. April 2010 und 4. Mai 2010 verringerte sich die Aktivität, jedoch am 5. Mai wiederholte sich die explosive Aktivität und erfolgte bis zum 18. Mai mit wechselnder Intensität. Die kontinuierliche vulkanische Aktivität nahm am 22. Mai völlig ab. Bei dieser explosiven Phase produzierte der Vulkan auch eine aschereiche Eruptionssäule, die aber nur die Höhe von 5.000 m erreichte und nur von 5. bis 7. Mai besonders dicht war.³⁸

3.2 Ausstoß

Bei einer Eruption stößt ein Vulkan flüssige Lava, Tephra und eine Menge an verschiedenen Gasen - besonders SO_2 - aus. Der Gesamtausstoß des Materials während der Eruption des Eyjafjallajökull 2010 wurde mithilfe von Bodenuntersuchungen und durch Fernerkundungen berechnet und beträgt $4,8 \pm 1,2 \times 10^{11}$ kg. Für eine bessere Vorstellung benutzt man das Dense-rock Equivalent (DRE), also ein Maß für das Volumen des Ausstoßes in Kubikkilometern. Das Dense-rock Equivalent betrug 2010 $0,18 \pm 0,05 \text{ km}^3$. Weil nur luftgestützte Partikel für die Luftfahrt bedrohend sind, wird in den nächsten Unterkapiteln nur diese Art von Ausstoß behandelt.³⁹

3.2.1 Menge

Wie schon in Kapitel 2 erläutert, haben feine Aschepartikel (1 - 30 μm) für die Luftfahrt eine besonders große Bedeutung. Das hängt mit der Verbreitungsfähigkeit dieser Asche zusammen – je kleiner und leichter die Teilchen, desto besser werden sie vom Wind vertrieben. Außerdem sinken sie als Fallout langsamer zum Boden.

Gudmundsson u.a. (2012) schätzte die gesamte Freisetzung von dieser feinen Asche zu 70 Tg,⁴⁰ wobei Stohl u.a. (2011) einen niedrigeren Wert von 11 Tg nennt.⁴¹ Die große Abweichung zeigt den Grad der Ungewissheit beim Abschätzen und Erstellen

³⁸ vgl. WOODHOUSE u. a., 2013, S. 92

³⁹ vgl. GUDMUNDSSON u. a., 2012, S. 1

⁴⁰ vgl. GUDMUNDSSON u. a., 2012, S. 1

⁴¹ vgl. STOHL u. a., 2011, S. 4333

von Modellen des Ausstoßes und dessen Verbreitung.⁴² Ebenfalls wurden große Mengen an Asche verfrachtet und sogar auf den Färöer oder in Italien beobachtet.^{43 44}

3.2.2 Eigenschaften

Probenentnahmen in einem 3 bis 55 km Radius vom Schlot entfernt zeigen, dass die freigesetzte Asche ungewöhnlich fein war, und zwar auch im Gebiet in der Nähe des Schlots, wo normalerweise größere Teilchen auftreten. Untersuchungen mit einem Rasterelektronenmikroskop beweisen weiterhin, dass während der ersten Phase der Eruption Magma in Kontakt mit Wasser gekommen ist und dass die Ascheteilchen eine unregelmäßige und kantige Form besitzen. Deshalb konnten die rauen Teilchen vom Wind leichter verfrachtet werden.

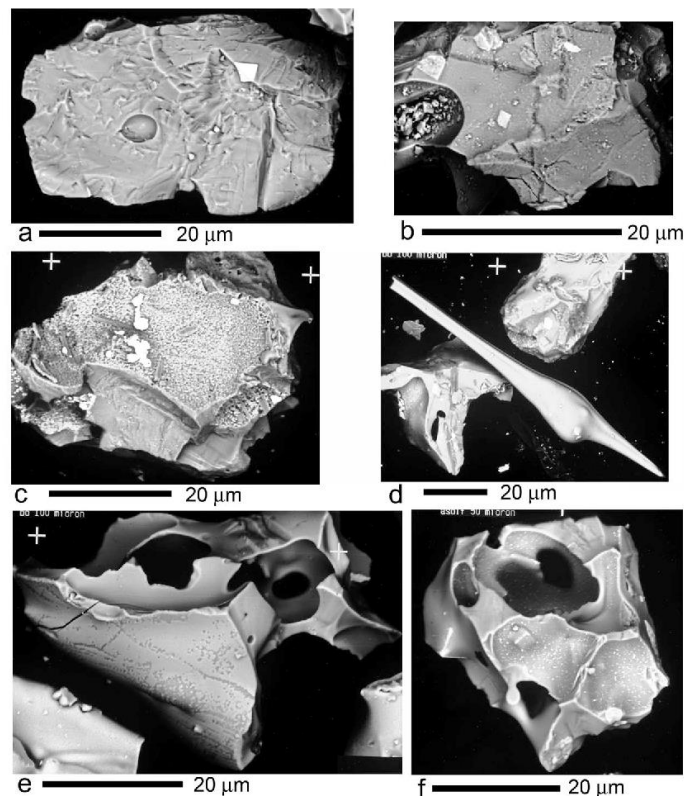


Abbildung 8: Ascheteilchen unter einem REM (Dellino u.a., 2012)

⁴² vgl. PRATA u. a., 2018, S. 5470

⁴³ vgl. GYLFASSON u. a., 2012, S. 85

⁴⁴ vgl. ROSSINI u. a., 2012, S. 1

Es besteht Grund zur Annahme, dass der spröde und unregelmäßige Charakter der Asche eine Hauptrolle bei der Verbreitung der Aschenwolke gespielt hat.⁴⁵ Kantige Asche besitzt auch abrasive Eigenschaften gegenüber Flugzeugen.

3.3 Bewegungen der Aschewolke und die Sperre des Luftraums

3.3.1 Meteorologische Voraussetzungen

Im Verlauf der Eruption veränderte sich die Höhe der Eruptionssäule, in den Tagen der ersten explosiven Phase schwankte sie zwischen circa 3.000 und 9.500 Meter über dem Meeresspiegel, wie uns Abbildung 9 zeigt. Offenbar befanden sich große Mengen an feiner Asche in vielen Schichten der Atmosphäre und damit genau in den Reiseflughöhen von heutigen Verkehrsflugzeugen.

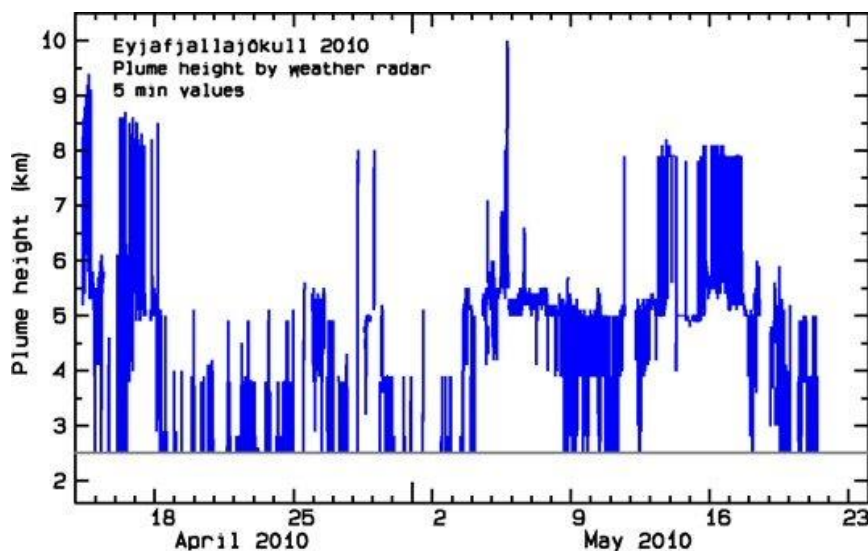


Abbildung 9: Höhe der Eruptionssäule im Verlauf der Zeit (Icelandic Met Office, 2010)

Im Zeitraum nach der Eruption, am Morgen des 14. April, herrschten in 7.000-10.000 Meter Höhe starke Nord- und Nordwestwinde vor, meist mit einer Geschwindigkeit, die 50 m/s überschritt. Damit wurde die Aschenwolke in Richtung Nord- und Westeu-

⁴⁵ vgl. DELLINO u. a., 2012, S. 1ff

ropa getrieben. Während der zweiten explosiven Phase im Mai überwog ein Nordwind, der die Asche über den Nordatlantik verfrachtet hat. Deshalb waren in Mai nur einige Transatlantikflüge sowie kleine Teile der Britischen Inseln betroffen.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass solche Winde im Frühjahr in Island selten vorkommen, also dass die Häufigkeit eines Westwindes im Frühling im Vergleich mit den Jahren 1993-2010 ungewöhnlich war.⁴⁶

3.3.2 Zeitachse der Sperren ^{47 48}

Rund 9:00 UTC am 14. April, ungefähr 5 Stunden nach dem Beginn der Eruption, empfängt die Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt (EUROCONTROL), jene Organisation die verantwortlich ist für die zentrale Koordination des Luftverkehrs in Europa, eine Frühwarnung vom Volcanic Ash Advisory Center in London (L-VAAC). Das L-VAAC ist eines von 9 globalen Warnzentren, die für die Beobachtung von Aschewolken zuständig sind.

Um 13:30 und 17:30 UTC werden zwei Telefonkonferenzen gehalten, Großbritannien bereitet sich auf eine mögliche Sperre seines Luftraums vor. Gleichzeitig lässt das L-VAAC sein Computermodell für Aschendispersion laufen, das zeigt, dass die Aschewolke bald in den britischen Luftraum eindringen wird.

Mithilfe dieses Modells werden vom L-VAAC regelmäßig Karten für die Vorhersage von Asche in der Atmosphäre erstellt und veröffentlicht. Die ersten Karten stammen vom Mittag des 14. April, siehe Abbildung 10.

⁴⁶ vgl. GYLFASSON u. a., 2012, S. 91f

⁴⁷ vgl. EUROCONTROL, 2010, S. 19ff

⁴⁸ vgl. WALLOP, 2010

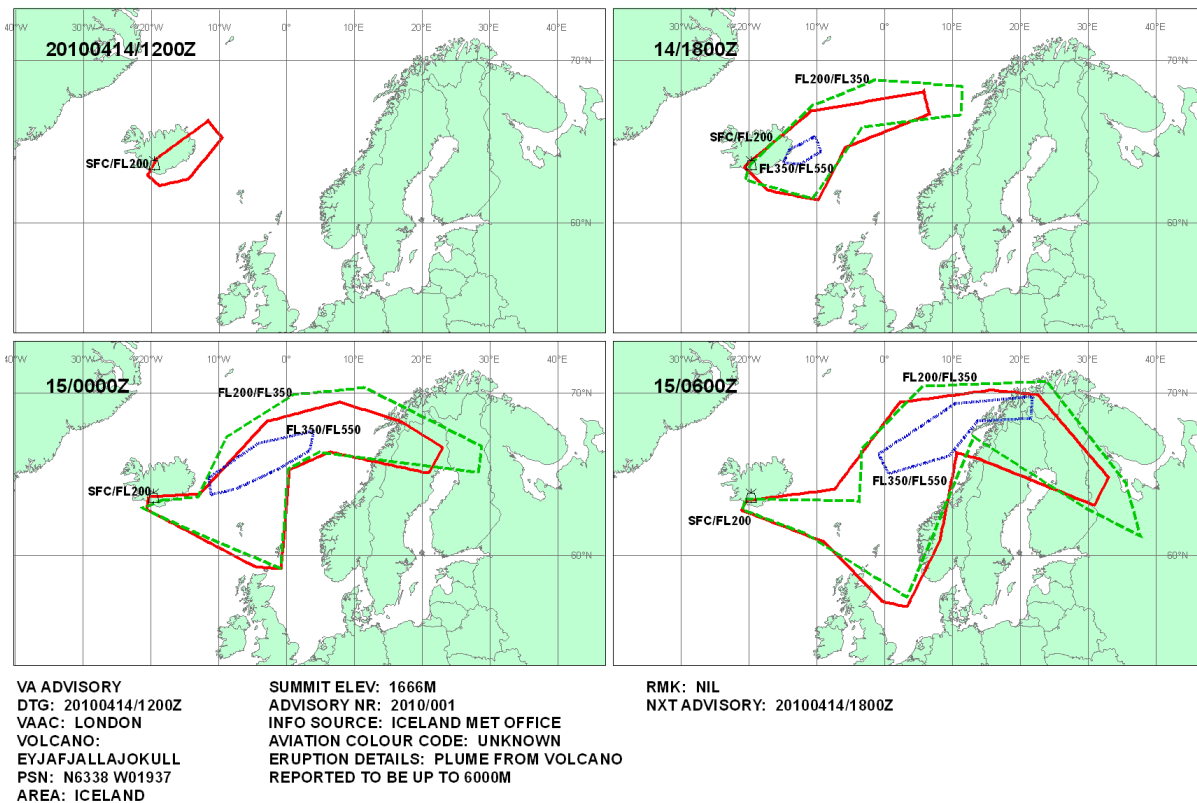


Abbildung 10: Aschevorhersage vom 14. April 2010 12:00 UTC für die nächsten 24 Stunden (Met Office, 2010)

In diesem Zusammenhang sind die ersten Regulationen am Abend in Kraft getreten. Norwegen und Großbritannien sperren Teile ihres Luftraums. Diese Entscheidung treffen auch später Schweden und Finnland. Zu bemerken ist, wie stark diese Sperren mit den oberen Karten (Abbildung 10) verbunden sind.

Um 9:00 UTC am 15. April erklärt Großbritannien seinen Luftraum zwischen Mittag und 18:00 UTC als geschlossen. Während des Tages schließen Dänemark, Irland, Niederlande, Belgien und Südschweden ihren Luftraum, am Nachmittag kommt auch der Maastricht-Sektor dazu.

Panik verbreitet sich in ganz Europa und es werden von EUROCONTROL regelmäßige Presskonferenzen gehalten. Weitere Teile des Europäischen Luftraums werden

am 16. April gesperrt, wie etwa Frankreich und Norddeutschland. Die Aschewolke verbreitet sich weiter nach Süden aufgrund des Nordwindes, wie auf der Karte vom Mittag des 16. April (Abbildung 10) zu sehen ist.

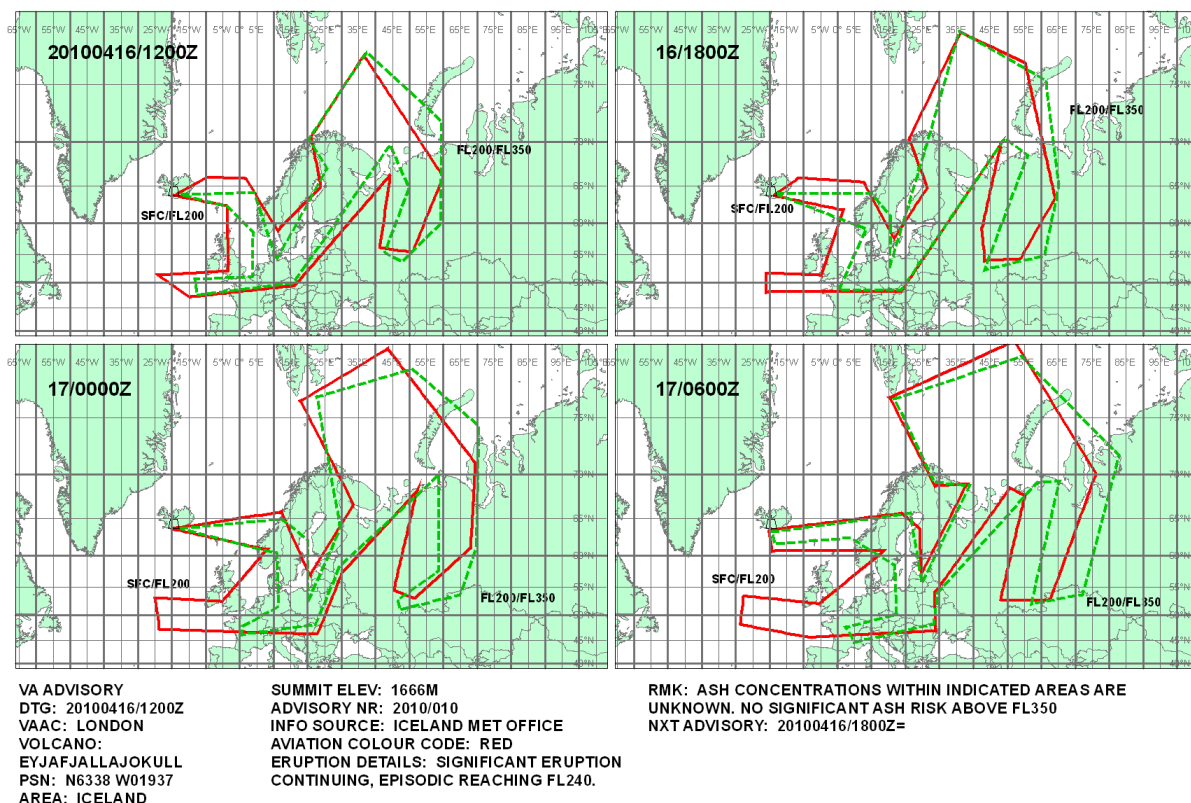


Abbildung 11: Aschevorhersage vom 16. April 2010 12:00 UTC für die nächsten 24 Stunden (Met Office, 2010)

In der Zwischenzeit bleiben praktisch alle Flughäfen in Westeuropa nördlich von Paris geschlossen, weitere Behörden wie Mailand, Padua, Genf, Zürich und München sind am Morgen des 17. April dazu gezwungen, ihre Lufträume zu sperren. Tschechien, die Slowakei, Polen, Österreich, Ungarn und Estland entscheiden sich auch für diese Vorgangsweise. Rund 20:00 UTC beginnt Rumänien und die Ukraine mit den Sperren. Entscheidend ist die Tatsache, dass sich alle bisher genannten Länder auf die gleichen Daten vom L-VAAC verlassen.

Am Mittag des 18. April weist der L-VAAC auf eine Verbesserung der Qualität der Luft hin, folglich werden langsam verschiedene Teile des europäischen Luftraums wieder geöffnet, erstens in Südfrankreich, später am Nachmittag wird der Luftraum über

20.000 Fuß in den folgenden Gebieten freigeschaltet: Maastricht, Rhein, Bremen, ganz Spanien, Frankreich, Österreich, Polen, Italien, Schweiz.

Dies lässt sich auch anhand der folgenden Karte (Abbildung 12) vom Mittag des 18. April erklären. Das rot abgegrenzte Gebiet zeigt, wo sich mit höchster Wahrscheinlichkeit Asche in der Atmosphäre unterhalb von 20.000 Fuß befindet. Das grüne Gebiet gilt für die Höhen zwischen 20.000 und 35.000 Fuß. Am Nachmittag waren die Bedingungen also günstig, den oben genannten Luftraum – im Süden – oberhalb von 20.000 Fuß zu öffnen, weil keine Asche dort vorhanden war.

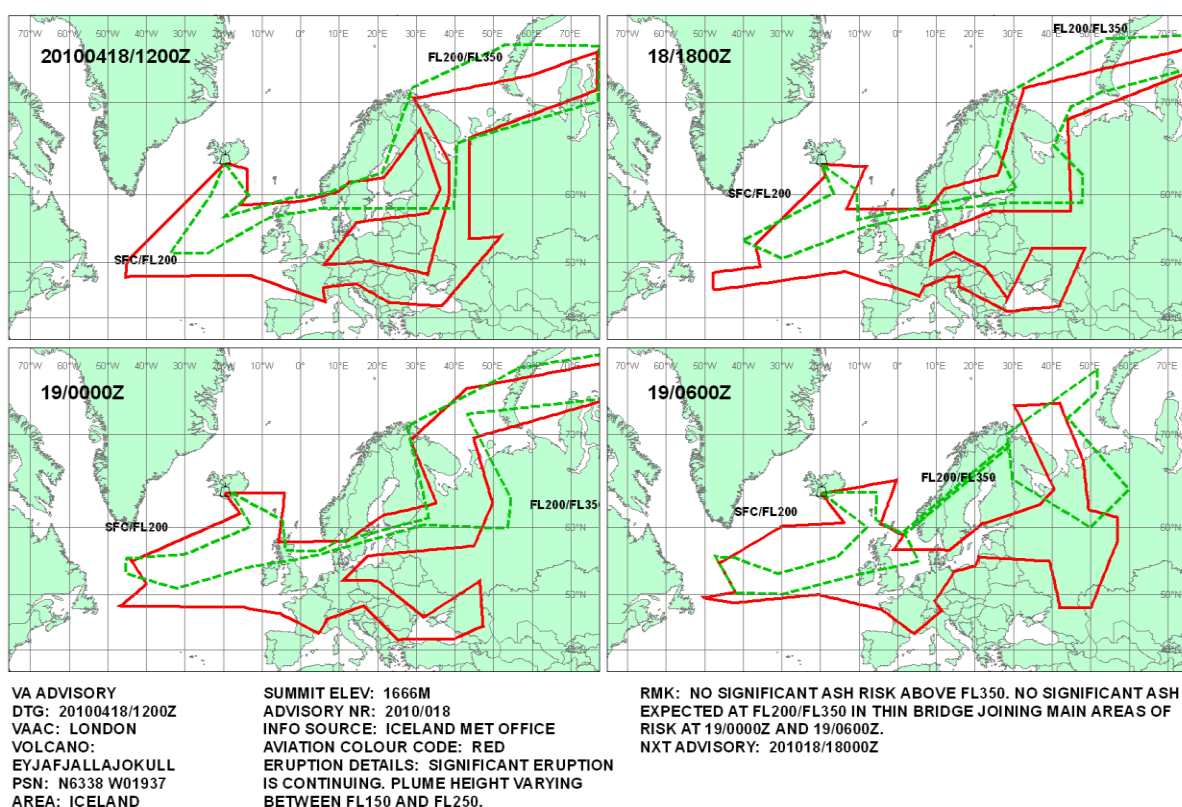


Abbildung 12: Aschevorhersage vom 18. April 2010 12:00 UTC für die nächsten 24 Stunden (Met Office, 2010)

Tagsüber am 19. April verbessert sich die Situation weiter. Folgender Luftraum wird geöffnet:

- Deutschland, Maastricht über 20.000 Fuß
- Frankreich über 21.000 Fuß

- Tschechien über 24.500 Fuß
- Rumänien, Slowakei, Schweiz über 28.500 Fuß
- Ganz Ukraine, Spanien und Bulgarien

Österreich erklärt seinen Luftraum nur als „Gefahrenbereich“ und genehmigt Flüge im Ermessen des Piloten.

Neue von der EU-Kommission erstellte Maßnahmen treten am 20. April in Kraft, die einen „differenzierten Ansatz zur Risikobewertung und harmonisiertes Entscheidungsverfahren innerhalb der EU“⁴⁹ unterstützen. Damit können am selben Tag und am 21. April fast alle Teile des Europäischen Luftraums geöffnet werden, mit Ausnahme von Teilen Nordschottlands, Schwedens, Finnlands und des Luftraums von Brest. Am 22. April kehrt wieder Normalität ein.

Insgesamt sind während dieser 8-Tages-Krise 104.000 Flüge abgesagt worden und circa 10 Millionen Passagiere konnten ihr Flugzeug nicht besteigen. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, haben 33 Länder ihren Luftraum teilweise (orange) oder komplett (rot) gesperrt.

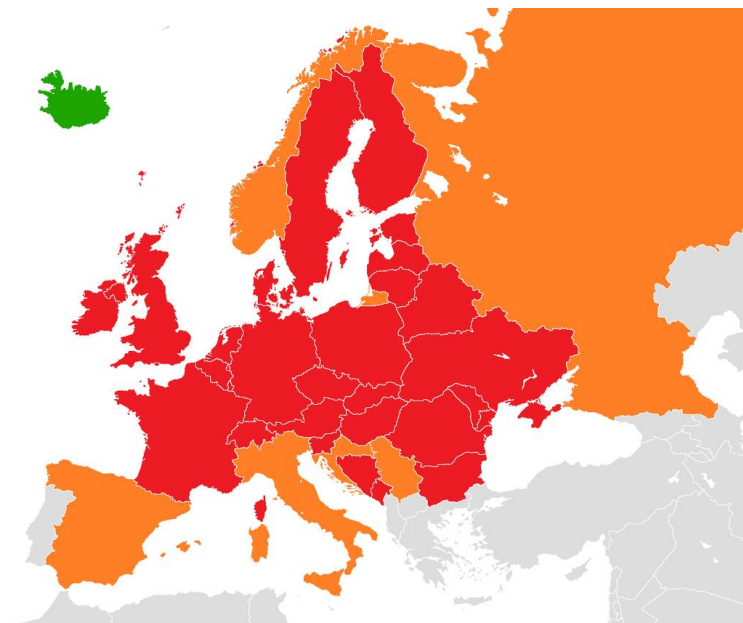


Abbildung 13: Mit den Sperren betroffene Staaten (DeltaFalcon, 2010)

⁴⁹ vgl. EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2010

4 Konsequenzen der Forschungsergebnisse für die aktuelle Luftfahrt

Im Nachhinein wird diskutiert, dass die Sperre des Europäischen Luftraums im April 2010 eine Überreaktion war. Die Faktoren von Risikoaversion und Unwissenheit spielten dabei eine große Rolle. Heutige Luftfahrzeuge besitzen kein Gerät, das verlässlich das Vorhandensein von Vulkanasche erkennen und messen kann. Grundsätzlich geht man davon aus, wenn Asche sichtbar ist, soll der Flug vermieden werden. Dieses Verfahren sollte aber als obsolet gelten, erstens weil es schwer zu bestimmen ist, ab welcher Größe Asche sichtbar wird, und zweitens, weil dies zu stark von den Lichtverhältnissen abhängig ist. Im Fall eines Nachtflugs fällt diese Möglichkeit sowieso weg.⁵⁰

51

Genau deshalb muss auf Ausbreitungsmodelle und verschiedene externe Messungen zurückgegriffen werden, wie zB. mithilfe von Satelliten mit IR-Strahlung. Dazu kommen eventuell Messungen bei der Quelle – beim Vulkan – die jedoch erst nach dem Ende der Eruption aus Sicherheitsgründen erfolgen können. In den Tagen nach der ersten Eruption war also unklar, wie viel Material und in welcher Konzentration sich in der Atmosphäre befindet. Außerdem war auch unklar, wie groß die Ascheverladung sein muss, um eine eigentliche Gefahr für Luftfahrzeuge und deren Triebwerke darzustellen.⁵²

Viele Behörden haben sich auf die gleichen Informationen des L-VAAC verlassen, die sich weiter auf ein Verbreitungsmodell namens NAME (Nuclear Accident ModEl) bezogen haben. Das Modell wurde ursprünglich für die Ausbreitung von radioaktiven Gasen aus Tschernobyl in den 80er Jahren entwickelt und angewendet. Mithilfe des Modells wurden Karten (siehe Kapitel 3.3.2), die vor dem Vorhandensein von Vulka-

⁵⁰ vgl. A. J. PRATA u. a., 2018, S. 5469

⁵¹ vgl. F. PRATA & ROSE, 2015b, S. 916

⁵² vgl. ALEXANDER, 2013, S. 13ff

nasche warnen, erstellt. Weil diese Berechnungen von einem Modell stammen, besitzen die in den Karten eingezeichneten Risikogebiete eine besonders ungenaue Form und können von physischen Messungen abweichen. Es sollte auch nicht vergessen werden, dass die Karten damals keine detaillierten Informationen über die Aschekonzentration dargestellt haben. Sie grenzten nur den Bereich ab, wo eine Überschreitung der $200 \mu\text{g m}^{-3}$ Aschekonzentration berechnet wurde. Es wurden also relativ große Gebiete als kontaminiert bezeichnet.^{53 54}

Die menschliche Psyche war bei den Sperren auch verantwortlich. Wie Beck (2002) beobachtet hat, will die moderne Gesellschaft Unsicherheit unter allen Umständen vermeiden und die Kontrolle über ihre Zukunft beherrschen, indem sie versucht, das Unberechenbare zu berechnen.⁵⁵ Dies kommt oft im Fall von Risikovermeidung vor: unklare Unsicherheit wird in ein kalkulierbares Risiko umgewandelt, egal wie schwammig.⁵⁶ Im Jahr 2010 war dies die Eruption Eyjafjallajökull, die dabei entstandenen schwebenden „Gefahrteilchen“ und ihre Distribution innerhalb des europäischen Luftraums. Dieses – auf den ersten Blick abstrakte Risiko – wurde in die Form von den oben genannten Vorhersagekarten übersetzt. November u.a. (2010) behaupten: „a large part of what we usually mean by “physical” is an imaginary virtual world born out of intellectual technologies – of which the map is arguably the most impressive.“⁵⁷ Tatsächlich waren die Karten einflussreich, da, wenn sie von der Seite eines Laien betrachtet wurden, sie besonders beunruhigend wirkten - eine Aschenwolke, anscheinend über ganz Europa, ist eine beängstigende Vorstellung.⁵⁸

Im Übrigen sollte man nicht vergessen, dass Europa davor keine Luftfahrtkrise solcher Größenordnung erlebt hatte. Es gab zwar eine ähnliche Eruption vom Grimsvótn im

⁵³ vgl. LUND & BENEDIKTSSON, 2011, S. 8

⁵⁴ vgl. UK CIVIL AVIATION AUTHORITY, o. J.

⁵⁵ vgl. BECK, 2002, S. 40

⁵⁶ vgl. LUND & BENEDIKTSSON, 2011, S. 8

⁵⁷ NOVEMBER, CAMACHO-HÜBNER & LATOUR, 2010, S. 594

⁵⁸ vgl. LUND & BENEDIKTSSON, 2011, S. 8

Jahr 2004, die hatte sich aber kaum auf den Luftverkehr ausgewirkt.⁵⁹ Deshalb war Europa ganz unvorbereitet und musste plötzlich reagieren. Großbritannien übernahm die Führungsrolle, bedingt durch die Nähe zur Nordsee und zum Eyjafjallajökull. Jedoch befinden sich in der 2010-Edition des britannischen Nationalregisters für Risikos, das die zentrale Behörde der britischen Regierung herausgibt, keine Maßnahmen zu Flugsicherheit im Fall einer Eruption. Ihre Entscheidungen waren daher rein reaktiv. Trotzdem sind Behörden Europas diesen Entscheidungen gefolgt.⁶⁰

4.1 Einrichtung von Grenzwerten

Nach dieser Krise war klar, dass Europa einen fixen, zentralisierten Plan zur Risikoeinschätzung in der Luftfahrt braucht. Gleichzeitig musste es dazu kommen, dass sich die Flugzeugindustrie und Wissenschaftler darüber einigen, wie hoch die Grenzwerte für Aschebelastung sind.

Die Erstellung von Grenzwerten stützt sich auf die Aschebelastung. Diese gibt an, welche Masse an Aschenteilchen in einem bestimmten Volumen Luft schwebt, in der Luftfahrt wird grundsätzlich pro Kubikmeter gemessen.

4.1.1 Grenzwerte vor dem 20. April 2010 ⁶¹

Im April 2010 waren trotz vieler Asche-Flugzeug Begegnungen aus der Vergangenheit keine Grenzwerte vorhanden. Ab dem Anfang der Krise herrschte ein Grenzwert **von 200 $\mu\text{g m}^{-3}$** , der kurzfristig, ohne wissenschaftliche Überprüfung oder Zustimmung der Luftfahrtindustrie in Kraft getreten ist.⁶² Das Durchfliegen einer Zone mit Aschekonzentration, die diesen Wert überschritten hat, war untersagt.

⁵⁹ vgl. F. PRATA & ROSE, 2015b, S. 915

⁶⁰ vgl. ALEXANDER, 2013, S. 14

⁶¹ vgl. SAMMONDS, MCGUIRE & EDWARDS, 2010, S. 12f

⁶² vgl. ALEXANDER, 2013, S. 14

Zum Vergleich: Es wird bei den Vorfällen vom Flug BA9 und KL867 in den 80er Jahren, wo die Triebwerke der Flugzeuge in beiden Fällen ausgefallen sind haben, geschätzt, dass sie einer Aschekonzentration von 2 g m^{-3} ausgesetzt waren. Dieser Wert liegt also 4 Größenordnungen höher, als der im April 2010 veröffentlichte Grenzwert.

4.1.2 Grenzwerte ab dem 20. April 2010 ⁶³

Erst gegen Ende der Flugverbote im April 2010 hat die Zivilluftfahrtbehörde Großbritanniens (Civil Aviation Authority oder CAA) Schritte unternommen, um die Grenzwerte zu erhöhen, hauptsächlich wegen des Drucks der Öffentlichkeit und Flugzeugbetreiber. Daher wurde der Grenzwert am 20. April von $200 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ **auf $2.000 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$** angehoben, wobei diese entstandene Zone zwischen $200 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ und $2.000 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ als „Enhanced Procedures Zone“ (EPZ) bezeichnet wurde. In diesem Bereich sollte man besonders vorsichtig vorgehen. Alles über $2.000 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ war eine Flugverbotszone (No-Fly Zone oder NFZ).

Eine weitere circa 110 Km-Pufferzone (60 nautische Meilen) an den Grenzen der Flugverbotszone, wo ein Flugverbot ebenfalls herrschte, wurde auch eingeführt. Die Karten vom L-VAAC sind ab dem 20. April demzufolge geändert worden, bzw. wurden die Karten der Art von Kapitel 3.3.2 noch mit detaillierteren Diagrammen über die Aschekonzentrationen ergänzt, siehe Abbildung 14.

⁶³ vgl. SAMMONDS, MCGUIRE & EDWARDS, 2010, S. 12f

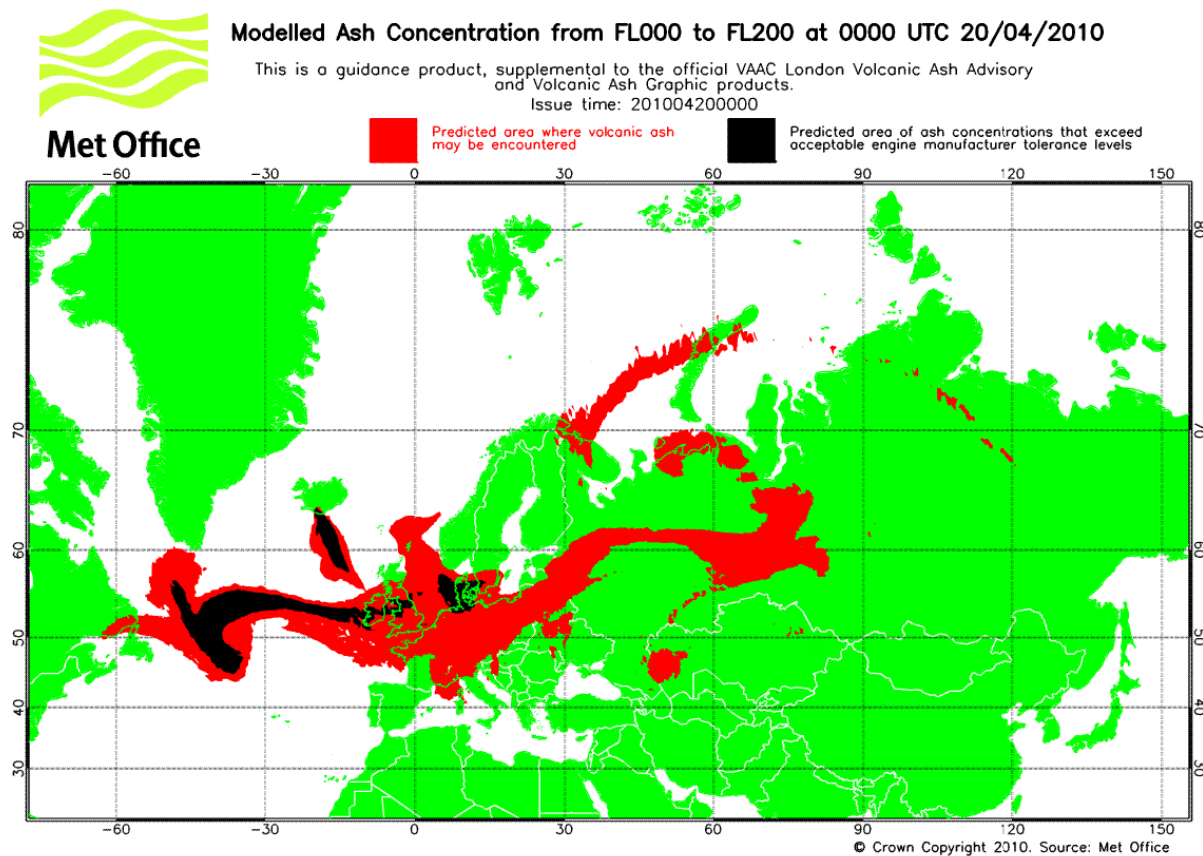


Abbildung 14: Eine ergänzende Vorhersagekarte vom 20. April 2010 (Met Office, 2010)

Belege für die Bestimmung dieser Grenzwerte waren für die CAA teilweise Testflüge eines Untersuchungsflugzeugs des britischen National Environmental Research Council, das in den Tagen nach der Eruption Daten über die Aschebelastung gesammelt hat, und teilweise auch ein dreistündiger Testflug einer Boeing 747, deren Triebwerke nachher auf Schäden durch Vulkanasche untersucht worden sind. Triebwerkshersteller wie General Electric, Pratt & Whitney and Roll-Royce haben an der Feststellung der Grenzwerte auch teilgenommen.⁶⁴

4.1.3 Revidierte Grenzwerte ab dem 17. Mai 2010

Nach weiterer Vereinbarung wurden die Grenzwerte am 17. Mai neu definiert, und zwar mit einem **Drei-Zonen-System**, das unter anderem Flüge durch kontaminierten Luftraum ermöglichte, solange bestimmte Sicherheitsmaßnahmen ausgeführt worden

⁶⁴ vgl. MARKS, 2010

sind oder wenn sich das Flugzeug im kontaminierten Luftraum nur kurzzeitig befand.⁶⁵
Die Zonen wurden folgendermaßen bestimmt:

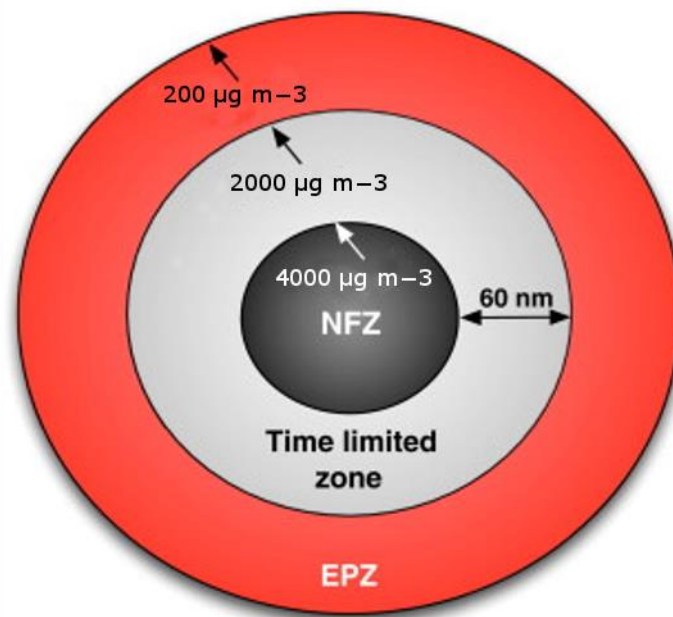


Abbildung 15: Das revidierte Drei-Zonen-System der CAA (Prata & Rose, 2015)

- **Niedrige Kontamination.** Die „enhanced procedures“ Zone ermöglicht den Flug in einer gemessenen oder modellierten Aschekonzentration zwischen $200 \mu\text{g m}^{-3}$ und $2.000 \mu\text{g m}^{-3}$. (Rot)
- **Hohe Kontamination.** Ein Flugverbot gilt in Lufträumen mit Aschenkonzentration größer als $4.000 \mu\text{g m}^{-3}$. (Schwarz)
- **Mittlere Kontamination.** Als Puffer zwischen den zwei Zonen wird ein 110-Km breites, zeitlimitiertes Gebiet erstellt. In diese Zone können Fluglinien eindringen, wenn sie einen Sicherheitsnachweis besitzen. Dieser kann bei der CAA beantragt werden. (Grau)
- Außerhalb dieser drei Zonen gelten normale Betriebsverfahren.^{66 67}

⁶⁵ vgl. F. PRATA & ROSE, 2015, S. 916

⁶⁶ vgl. ebd.

⁶⁷ vgl. UK CIVIL AVIATION AUTHORITY, o. J.

Die eingeführten Grenzwerte gelten bis heute in Großbritannien als Standard und würden im Fall einer Eruption von anderen europäischen Ländern voraussichtlich verabschiedet.⁶⁸ Jedoch kommt das Verfahren in der 2012-Edition des Handbuchs für Flugsicherheit und Vulkanasche der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation nicht vor.⁶⁹

Seitdem werden supplementäre Vorhersagekarten vom London VAAC sowie vom Toulouse VAAC in Frankreich bei Eruptionen veröffentlicht, die Informationen über die oben genannten Aschenkonzentrationen anbieten, siehe Abbildung 16 und 17.⁷⁰

Wie viele Zeitschriften damals berichteten, hätte es mit den neuen Regeln kaum Flugverbote gegeben:

„Laut BBC haben britische Forscher bei ihren Testflügen in vergangenen Tagen nirgends mehr als 400 Mikrogramm pro Kubikmeter gemessen. Die bisher einzige deutsche Analyse durch ein Flugzeug des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt hatte am Montagnachmittag über Leipzig Werte von 60 Mikrogramm pro Kubikmeter ergeben.“⁷¹

Prata & Prata (2012) zeigten außerdem mithilfe von Satellitenuntersuchungen mit IR-Strahlung, dass die Grenze von $4.000 \mu\text{g m}^{-3}$ nur in circa 3 % der Fälle überschritten wurde.⁷² Daraus kann abgeleitet werden, dass eine Luftraumsperrung dieser Magnitude nicht nötig war.

⁶⁸ vgl. ebd.

⁶⁹ vgl. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2012

⁷⁰ vgl. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, 2016, S. 52ff

⁷¹ SCHRADER, 2010

⁷² vgl. A. J. PRATA & PRATA, 2012, S. 1

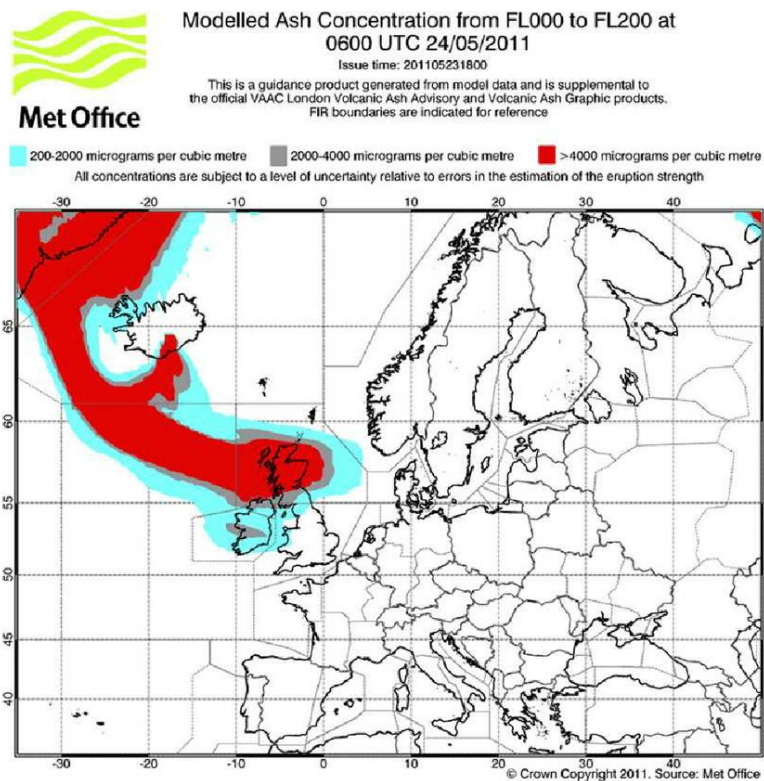


Abbildung 16: Britische ergänzende Karte nach der Eruption des Grimsvótn 2011 (Met Office, 2011)

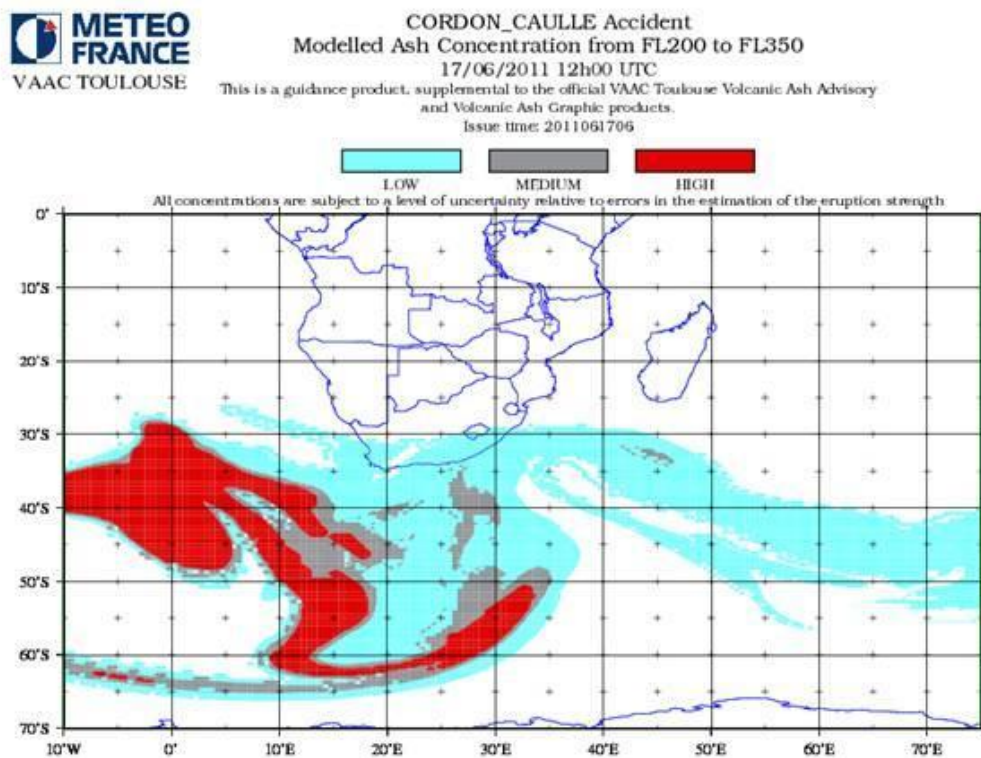


Abbildung 17: Französische ergänzende Karte nach der Eruption des Vulkankomplexes Puyehue-Cordón Caulle 2011 (Météo-France, 2011)

5 Übersicht über das statistische Material von EUROCONTROL und deren Auswertung ⁷³

Die Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt (im Folgenden „EUROCONTROL“) veröffentlichte 2010 eine vollständige Sammlung von Daten und Statistiken zur operativen Auswirkung der Eruption auf die Luftfahrt. Dieses Dokument – „Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic“ – gibt einen besonderen Einblick in die Zahlen der täglich abgesagten und betroffenen Flüge und einen Einblick, wie stark bestimmte Länder betroffen waren. Da eine solche Krise von vielen Sichtpunkten betrachtet werden kann, konzentriert sich der Bericht ausschließlich auf die Statistiken und die Analyse von Daten. Als Ziel setzten sich die Forscher die Erstellung einer Grundlage zur zukünftigen Einschätzung der Auswirkungen einer Aschenwolke auf Flugannullierungen und Flugverspätungen.

5.1 Methoden der Datenauswertung

Die in den Statistiken dargestellten Ergebnisse beruhen auf einer Einschätzung, die mithilfe der Flugplanarchive von EUROCONTROL berechnet wurde. Für die Berechnung der annullierten Flüge wurde die folgende Formel angewendet:

$$\text{annulierte Flüge} = \text{erwartete Flüge} - \text{tatsächliche Flüge}$$

Unter „erwarteten Flügen“ versteht man das gewichtete arithmetische Mittel von absolvierten Flügen am gleichen Tag der Woche *vor* und *nach* der Krise. Im April sind die Abweichungen von täglichen Flügen ziemlich groß, einerseits wegen Ostern und andererseits die Menge an Passagieren jede Woche steigt, um den Sommer-Höchststand zu erreichen. Aus diesem Grunde wurden die Kalkulationen mit dem gewichteten arithmetischen Mittel durchgeführt.

„Tatsächliche Flüge“ stellen den Wert der in Wirklichkeit absolvierten Flüge dar, die an einem bestimmten Tag gemeldet wurden.

⁷³ vgl. EUROCONTROL, 2010

Als Vergleichsgröße für die Flugverspätungen wurden die Werte vom Vorjahr eingesetzt, nämlich die von April und Mai 2009.

5.2 Annullierungen

Die folgende Grafik liefert Informationen über die Entwicklung des Flugverkehrs in Europa vor und während der Krise im April 2010. „Europa“ bezieht sich in diesem Fall auf das „EUROCONTROL Statistical Reference Area“, welches unter anderem auch Teile der Türkei beinhaltet.

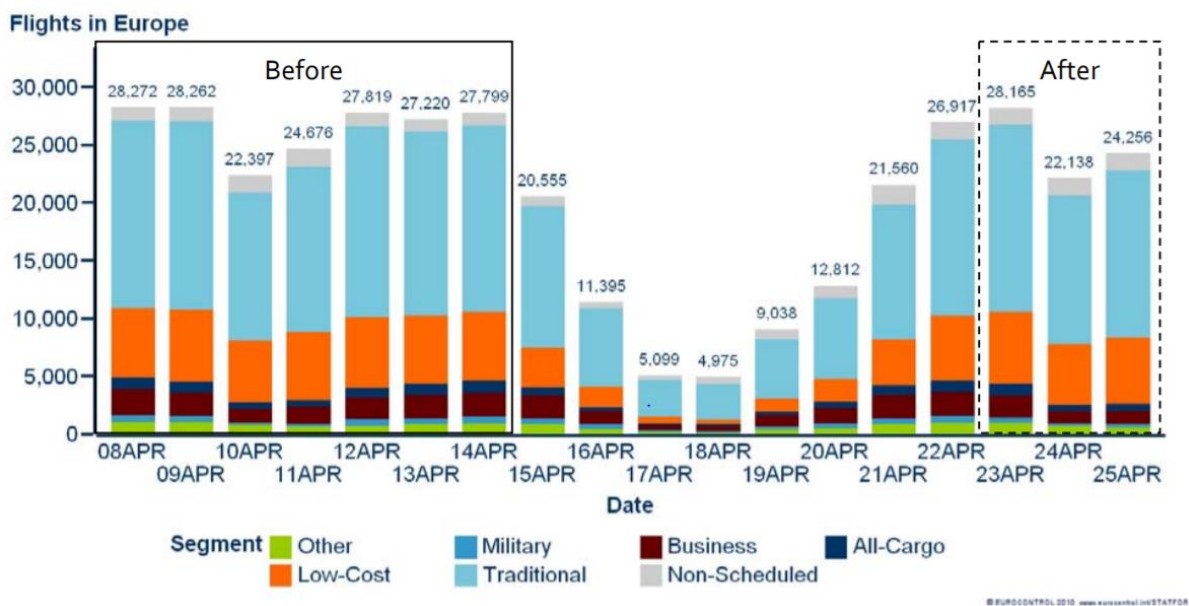


Abbildung 18: Anzahl der Flüge in Europa pro Tag, April 2010 (EUROCONTROL, 2010)

Der Balkendiagramm zeigt die Entwicklung der absoluten Anzahl von täglich durchgeführten Flügen von 8. April 2010 bis 25. April 2010. Die Legende gibt Auskunft über die Art des Fluges, der Großteil von täglichen Flügen waren also traditionelle Zivilflüge. Man kann zu Beginn der Krise am 15. April eine rasche Abnahme beobachten.

Die Abnahme entspricht außerdem der Abbildung 19, welche die relativen Anteile von stornierten Flügen pro Tag beschreibt. Während der Krise, die 8 Tage dauerte, wurden insgesamt 48% der geplanten Flüge abgesagt, wobei die Annullierungen am 18. April ihren Höchststand mit 80% erreicht haben. Billigfluggesellschaften waren am meisten Betroffenen, sie haben 61% ihrer Flüge verloren.

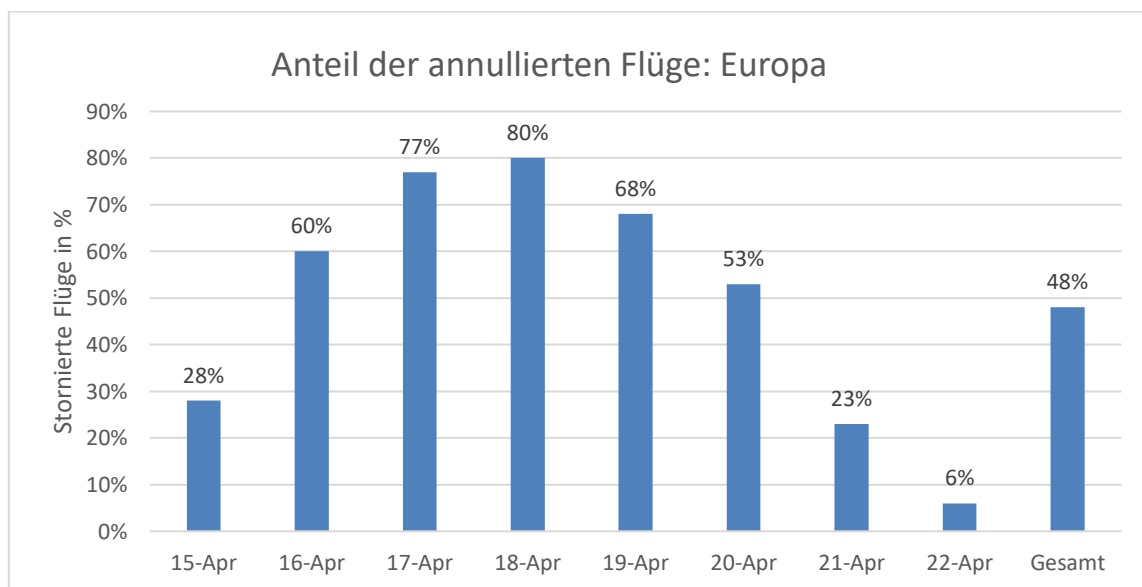


Abbildung 19: Anteil der annullierten Flüge: Europa (McLaren, 2019 aus Daten⁷⁴ von EUROCONTROL, 2010)

Denn die Flugplanarchiven von EUROCONTROL stellen auch Information über den Flugzeugtyp zur Verfügung, konnten Aussagen über die Menge von betroffenen Passagieren gemacht werden. Um eine Einschätzung zu bekommen, hat man angenommen, dass Flüge innerhalb Europas zu 75% ausgebucht waren und Flüge mit einem Ursprung/Destination außerhalb Europas zu 85% ausgebucht waren.

In diesem Zusammenhang konnten zwischen dem 15. und 22. April 10 Millionen Passagieren ihren Flug nicht besteigen, am 18. April, als die Krise zum Höhepunkt kam, ging es selbst um 2,1 Millionen Passagiere.

Man sollte aber bedenken, dass die Anzahl von Betroffenen eher kleiner sein wird, da manche Passagiere mehrmals betroffen werden müssten, zB. im Fall wo sie am gleichen Tag 2 Flüge gebucht hatten.

⁷⁴ vgl. ebd. S. 10

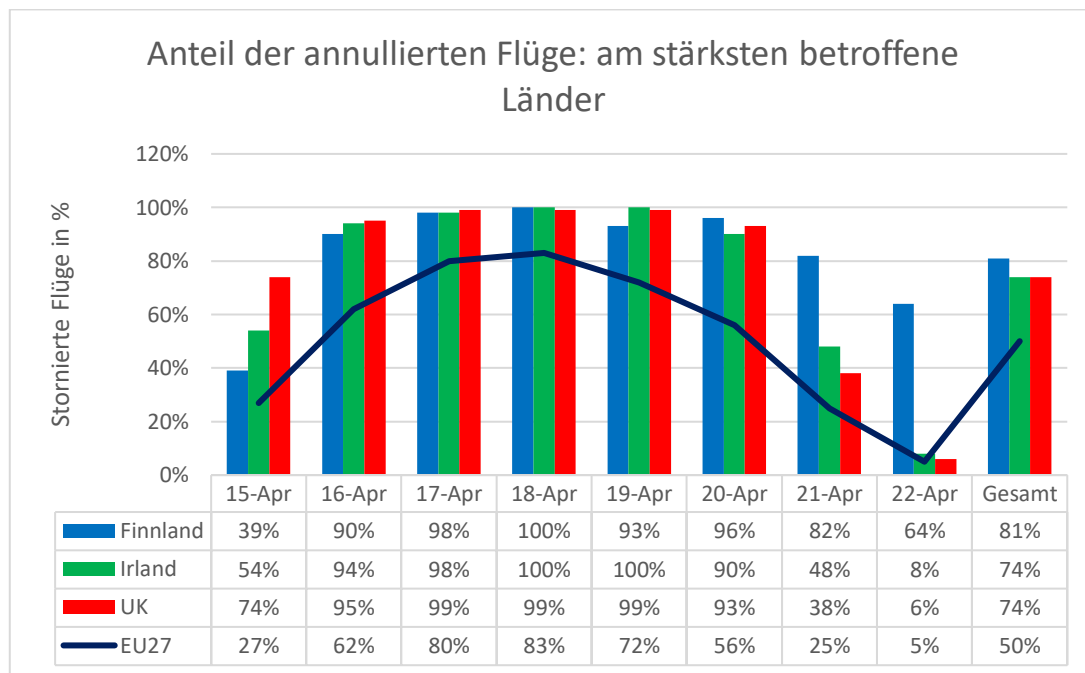


Abbildung 20: Anteil der annullierten Flüge: am stärksten betroffene Länder (McLaren, 2019 aus Daten⁷⁵ von EURO-CONTROL, 2010)

Abbildung 20 zeigt die am stärksten betroffenen Länder und ihre respektiven Prozentsätze von abgesagten Flügen pro Tag. Alle drei Länder – Finnland, Irland und Großbritannien – haben an 5 aufeinanderfolgenden Tagen mehr als 90% deren Flüge abgesagt. Um die Werte in Kontrast zu bringen werden sie mit einer dunkelblauen Kurve ergänzt. Diese Kurve gibt die durchschnittliche Annullierung der ganzen EU-27 wieder.

5.3 Verspätungen

Verglichen mit April 2009 sind die mittleren Verspätungen von April 2010 höher, besonders die zur Kategorie „andere Ursachen“ zuzurechnenden Verspätungen sind gestiegen. (dh. vulkanische Aktivität)

Interessanterweise waren Flüge von den Verspätungen her durch die Aschewolke im Mai mehr beeinträchtigt als im April, vermutlich weil April reicher an Flugannullierungen als Verspätungen war. Verspätete Abflüge sind im Mai 2010 gegenüber Mai 2009 um 10% gestiegen, auf den Wert von 43%.

⁷⁵ vgl. ebd.

5.4 Auswirkungen auf Tschechien und Österreich

Die folgenden Statistiken beschreiben, wie stark Tschechien und Österreich betroffen waren. Ihre geographische Lage ist zwar ganz ähnlich, beide Staaten befinden sich in Zentraleuropa, trotzdem weisen die Daten unterschiedliche Zahlen auf.

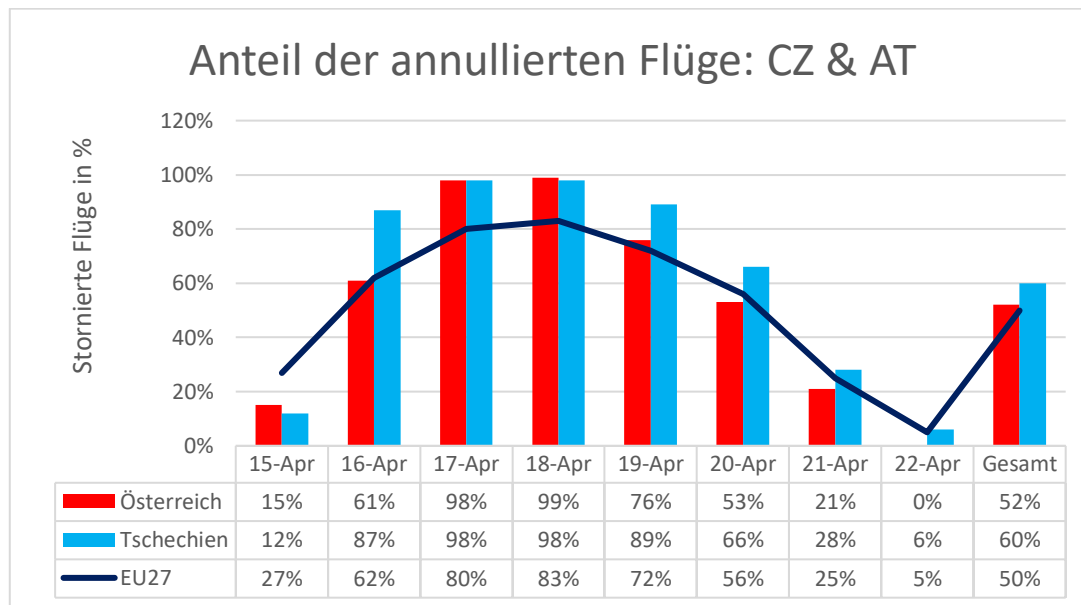


Abbildung 21: Anteil der annullierten Flüge: CZ & AT (McLaren, 2019 aus Daten⁷⁶ von EUROCONTROL, 2010)

Aus der Statistik in Abbildung 21 ist zu ersehen, dass sich die Eruption mehr auf Tschechien als auf Österreich ausgewirkt hat. Am letzten Tag der Krise mussten sogar 6% der Flüge in Tschechien abgesagt werden, während Österreich mit keinen Problemen in der Luftfahrt konfrontiert wurde. Am einzigen Tag – am 18. April – wurden in Österreich mehr Flüge als in Tschechien abgesagt. Die Zahlen sind wieder ergänzt von einer Kurve der EU-27.

Die Abweichungen der beiden Länder sind aus zwei Gründen vorhanden. Erstens liegt Tschechien weiter im Norden und wurde dadurch der Aschenwolke länger ausgesetzt, zweitens genehmigten die österreichischen Behörden am 19. April das Fliegen „im Ermessen des Piloten“, was vermutlich die Abnahme an annullierten Flügen in Österreich am selben Tag bewirkt hat.

⁷⁶ (vgl. EUROCONTROL, 2010, S. 10)

	Flughafen	15-Apr	16-Apr	17-Apr	18-Apr	19-Apr	20-Apr	21-Apr	22-Apr	Gesamt
1	HELSINKI-VANTAA	24%	89%	99%	99%	98%	98%	91%	72%	82%
2	DUBLIN	76%	87%	97%	100%	99%	97%	63%	6%	77%
3	MANCHESTER	94%	97%	97%	99%	100%	96%	10%	-1%	75%
27	PRAHA RUZYNE	-4%	76%	97%	98%	78%	48%	20%	0%	50%
29	WIEN SCHWECHAT	5%	57%	98%	99%	42%	20%	7%	2%	38%

Tabelle 1: Anteil der annullierten Flüge: 5 ausgewählte Flughäfen (McLaren, 2019 aus Daten⁷⁷ von EUROCONTROL, 2010)

Die Tabelle 1 liefert Informationen über Flugannullierungen am größten Flughafen Österreichs bzw. Tschechiens. Zum Vergleich sind in die Tabelle auch Daten über die 3 am stärksten betroffene Flughäfen Europas in absteigende Reihenfolge dargestellt. Jedoch wurden die Zahlen nur einem Datensatz von 40 verkehrsreichsten Flughäfen Europas entnommen, kleine Flughäfen wurden deshalb nicht berücksichtigt.

Insgesamt wurde Prag – ähnlich wie ganz Tschechien – mehr als Wien-Schwechat beeinträchtigt, dort wurden 50% bzw. 38% von erwarteten Flügen abgesagt. Die meisten Annullierungen erfolgten an beiden Flughäfen am selben Tag – am 18. April. Dieser Trend kommt in ganz Europa vor. Man kann beobachten, dass Wien und Prag viel weniger Flüge abgesagt haben als Flughäfen in Nordeuropa oder andere europäische Flughäfen.

Negative Werte weisen auf einen Überschuss hin. Das heißt, dass an einem Tag mehr Flüge erfolgten, als erwartet war. Dies war bedingt hauptsächlich durch Repositionierung von festsitzenden Flugzeugen, deren Passagiere und Besatzung oder durch die Umleitung von Flügen wegen der Aschewolke.

⁷⁷ (vgl. EUROCONTROL, 2010, S. 14)

6 Resümee

Vulkanasche in der Atmosphäre kann eine ernsthafte Bedrohung für die Luftfahrt darstellen. Die Triebwerke von heutigen Flugzeugen sind besonders gefährdet, da Vulkanasche sie verstopfen und ihren wichtigen Teilen schaden kann. Äußere Oberflächen können unter Abrasion leiden und im schlimmsten Fall können diese Schäden einen Absturz verursachen. Obwohl dieses noch nicht passiert ist, kennt man aus der Vergangenheit – wie im Fall des Flugs BA9 – die schwerwiegenden Risiken eines Flugs durch einen mit Vulkanasche kontaminierten Luftraum.

Die Eruption des Schichtvulkans Eyjafjallajökull im April/Mai 2010 paralyisierte für mehrere Tage die europäische Mobilität. Ein Zusammenspiel von einigen Faktoren – in etwa feine Asche, ungünstige Winde – bewirkte die Verbreitung der entstandenen Aschewolke über ganz Europa. Aufgrund dessen kam es von 15. April bis 22. April zu Luftraumsperrungen, die bis Südeuropa reichten. Statistiken von EUROCONTROL informieren über die Zahlen von annullierten Flügen und betroffenen Passagieren, insgesamt wurden mehr als 104.000 Flüge abgesagt, davon waren circa 10 Millionen Passagiere betroffen, wobei Nordeuropa am meisten litt.

Hätte es vor der Krise Grenzwerte gegeben, welche ein gewisses Maximum von Asche in der Atmosphäre zuließen und die erst nach der Krise veröffentlicht worden wären, hätte es nur wenige Flugverbote gegeben. Eine abwartende Haltung der Behörden erschwerte die Situation weiter, obwohl es in Betracht genommen werden sollte, dass sie überhaupt keine Vorerfahrung hatten und wollten nur Risiken vermeiden.

Für die Zukunft wird wichtig, dass europäische Staaten einen gemeinsamen Lösungsansatz für Risikoeinschätzung finden, der im Fall einer Eruption blitzartig eingesetzt werden könnte, und dass sie mit den möglichen Luftraumsperrungen einheitlich vorgehen.

Der Arbeitsverlauf erfolgte sehr flüssig und ohne große Schwierigkeiten. Ich persönlich habe die Verarbeitung von den Vorhersagekarten hochinteressant gefunden.

7 Literaturverzeichnis

7.1 Sekundärliteratur

STEWART, Stanley (2002): *Emergency! Crisis on the Flight Deck*. Ramsbury: The Crowood Press UK

7.2 Beiträge in wissenschaftlichen Zeitschriften

ALEXANDER, David (2013): Volcanic ash in the atmosphere and risks for civil aviation: A study in European crisis management. *International Journal of Disaster Risk Science; Heidelberg*, 4 (1), S. 9–19

BECK, Ulrich (2002): The Terrorist Threat: World Risk Society Revisited. *Theory, Culture and Society*, 19 (4), S. 39–55

DELLINO, P. u. a. (2012): Ash from the Eyjafjallajökull eruption (Iceland): Fragmentation processes and aerodynamic behavior. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117 (B9) Online verfügbar unter: URL: <http://agupubs.online-library.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JB008726> [15.09.2019]

DIAMOND, Jack (1986): Down to a Sunless Sea. *The Log*, (April 1986), S. 13–16

DUNN, Michael G. (2012): Operation of Gas Turbine Engines in an Environment Contaminated With Volcanic Ash. *Journal of Turbomachinery*, 134 (5), S. 051001

GUDMUNDSSON, Magnús T. u. a. (2012): Ash generation and distribution from the April-May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Scientific Reports (Nature Publisher Group); London*, 2, S. 572

LUND, Katrín Anna, BENEDIKTSSON, Karl (2011): Inhabiting a risky earth: The Eyjafjallajökull eruption in 2010 and its impacts (Respond to this article at <http://www.therai.org.uk/at/debate>). *Anthropology Today*, 27 (1), S. 6–9

- NOVEMBER, Valérie, CAMACHO-HÜBNER, Eduardo, LATOUR, Bruno (2010): Entering a risky territory: Space in the age of digital navigation. *Environment and Planning D: Society and Space*, 28 (4), S. 581–599
- PRATA, A. J. u. a. (2018): Ash Metrics for European and Trans-Atlantic Air Routes During the Eyjafjallajökull Eruption 14 April to 23 May 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (10), S. 5469–5483
- PRATA, A. J., PRATA, A. T. (2012): Eyjafjallajökull volcanic ash concentrations determined using Spin Enhanced Visible and Infrared Imager measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117 (D20) Online verfügbar unter: URL: <http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JD016800> [24.11.2019]
- ROSSINI, Paolo u. a. (2012): April–May 2010 Eyjafjallajökull volcanic fallout over Rimini, Italy. *Atmospheric Environment*, 48, S. 122–128
- SIGMUNDSSON, Freysteinn u. a. (2010): Intrusion triggering of the 2010 Eyjafjallajökull explosive eruption. *Nature; London*, 468 (7322), S. 426–30
- STOHL, A. u. a. (2011): Determination of time- and height-resolved volcanic ash emissions and their use for quantitative ash dispersion modeling: the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Atmospheric Chemistry and Physics; Katlenburg-Lindau*, 11 (9) Online verfügbar unter: URL: <http://search.proquest.com/docview/867784661/abstract/2FC2C86933FF4FC4PQ/1> [15.09.2019]
- WOODHOUSE, M. J. u. a. (2013): Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118 (1), S. 92–109

7.3 Berichte und Verordnungen

- CASADEVALL, Thomas J. (1994): *Volcanic ash and aviation safety; proceedings of the First international symposium on Volcanic ash and aviation safety*. Seattle: U.S. Geological Survey Online verfügbar unter: URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/b2047> [10.05.2019]
- EUROCONTROL (2010): *Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic*. Nr. 394. EUROCONTROL Online verfügbar unter: URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/article/attachments/201004-ash-impact-on-traffic.pdf> [24.09.2019]
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010): *Volcanic Ash Crisis: Frequently Asked Questions*. Press Release Nr. MEMO/10/143. Brüssel: Europäische Kommission Online verfügbar unter: URL: [https://europa.eu/rapid/press-release MEMO-10-143_en.htm](https://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-10-143_en.htm) [29.09.2019]
- GUFFANTI, Marianne, CASADEVALL, Thomas J., BUDDING, Caren (2010): *Encounters of Aircraft with Volcanic Ash Clouds: A Compilation of Known Incidents, 1953–2009*. Data Series. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey
- GYLFASON, Ágúst u. a. (2012): *The 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland*.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (2012): *Flight Safety and Volcanic Ash*. Montréal: International Civil Aviation Organization Online verfügbar unter: URL: https://www.icao.int/publications/Documents/9974_en.pdf
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (2016): *Volcanic Ash Contingency Plan – European and North Atlantic Regions*. Online verfügbar unter: URL: <https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/EUR+NAT%20VACP.pdf> [24.11.2019]
- SAMMONDS, Peter, MCGUIRE, Bill, EDWARDS, Stephen (2010): *Volcanic Hazard from Iceland: analysis and implications of the Eyjafjallajökull eruption*. London: UCL Institute

for risk and disaster reduction Online verfügbar unter: URL: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1333739/1/icelandreport.pdf> [23.11.2019]

7.4 Lexika und Online-Lexika

DELIGNE, Natalia Irma, SIGURDSSON, Haraldur (2015): Chapter 14 - Global Rates of Volcanism and Volcanic Episodes. In: Haraldur SIGURDSSON (Hrsg.): *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* (S. 265–272). Amsterdam: Academic Press Online verfügbar unter: URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123859389000146> [10.05.2019]

EDITOREN DER BROCKHAUS ENZYKLOPÄDIE ONLINE (2019): Elmsfeuer. In: *Brockhaus Enzyklopädie Online*. NE GmbH | Brockhaus Online verfügbar unter: URL: <https://brockhaus.de/ecs/permalink/7D84C861640F5EEDA4E97041EA86F2CF.pdf>

MARTIN, Christiane u. a. (2000): Vulkanismus. In: *Lexikon der Geowissenschaften online*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag Online verfügbar unter: URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/vulkanismus/17805> [08.09.2019]

PRATA, Fred, ROSE, Bill (2015): Chapter 52 - Volcanic Ash Hazards to Aviation. In: Haraldur SIGURDSSON (Hrsg.): *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* (S. 911–934). Amsterdam: Academic Press Online verfügbar unter: URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123859389000523> [09.05.2019]

RAFFERTY, John P. (2017): Eyjafjallajökull volcano. In: *Encyclopaedia Britannica Online* verfügbar unter: URL: <https://academic-eb-com.ezproxy.techlib.cz/levels/collegiate/article/Eyjafjallaj%C3%B6kull-volcano/488358> [06.09.2019]

7.5 Zeitungen

MARKS, Paul (2010, 21. April): Engine strip-downs establish safe volcanic ash levels. *New*

Scientist Online verfügbar unter: URL: <https://www.newscientist.com/article/dn18802-engine-strip-downs-establish-safe-volcanic-ash-levels/> [23.11.2019]

SCHRADER, Christopher (2010, 20. Mai): Unnötige Flugverbote. *sueddeutsche.de* Online

verfügbar unter: URL: <https://www.sueddeutsche.de/wissen/aschewolke-ueber-europa-unnoetige-flugverbote-1.935011> [24.11.2019]

WALLOP, Harry (2010, 20. April): Volcanic ash cloud: timeline. *The Telegraph Online* Online

verfügbar unter: URL: <https://www.telegraph.co.uk/travel/travel-news/7607975/Volcanic-ash-cloud-timeline.html> [24.09.2019]

7.6 Visuelle Quellen

KOŘEN, Vladimír (2010, 22. April): Island: Můžou přijít ještě silnější erupce. *Události On-*

line verfügbar unter: URL: <https://ct24.ceskatelevize.cz/svet/1340765-eyjafjallajokull-je-proti-katle-jen-cajicek> [06.09.2019]

7.7 Online-Quellen

GLOBAL VOLCANISM PROGRAM (2013a): *Eyjafjallajökull*. Online verfügbar unter: URL:

<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=372020> [06.09.2019]

GLOBAL VOLCANISM PROGRAM (2013b): *Galunggung*. Online verfügbar unter: URL:

<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=263140> [10.06.2019]

KASPAR, Nadine (o. J.): *Schichtvulkan*. Online verfügbar unter: URL: http://phzh.edunet2.ch/n.kasper/ws_gen/?7 [06.09.2019]

KMO TURBO GMBH (o. J.): *Pumpschutz*. Online verfügbar unter: URL: https://www.kmo-turbo.de/pumpschutz/pumpschutz_print.htm [29.05.2019]

SZEGLAT, Marc (o. J.): *Vulkanausbrüche, Eruptionen und Vulkanasche*. Online verfügbar unter: URL: <http://www.vulkane.net/vulkanismus/vulkanausbruch-eruption-vulkanasche.html> [09.05.2019]

UK CIVIL AVIATION AUTHORITY (o. J.): *Managing ash in UK airspace*. Online verfügbar unter: URL: <https://www.caa.co.uk/Safety-initiatives-and-resources/Safety-projects/Volcanic-ash/Managing-ash-in-UK-airspace/> [29.09.2019]

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2015, 14. Dezember): *Volcanic Ash Impacts & Mitigation - Effects on Aircraft*. Online verfügbar unter: URL: https://volcanoes.usgs.gov/volcanic_ash/ash_clouds_air_routes_effects_on_aircraft.html [11.05.2019]

VOLCANODISCOVERY (2019, 9. Mai): *Vulkanisches Begriffslexikon: Asche (vulkanische Asche)*. Online verfügbar unter: URL: <https://www.volcanodiscovery.com/de/vulkane/lexikon/asche.html> [09.05.2019]

7.8 Bilder

DAHL, Jeff (2016): Diagram of a typical gas turbine jet engine. Online verfügbar unter: URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jet_engine_de.svg

DELLINO, P. u.a. (2012, 1. September): Montage showing a selection of representative ash particles at the SEM. Online verfügbar unter: URL: [https://www.semanticscholar.org/paper/Ash-from-the-Eyjafjallaj%C3%B6kull-eruption-\(Iceland\)%3A-Dellino-Gudmundsson/a55785e73c5d1ebaa1fcca0b42c6063491506ddf/figure/3](https://www.semanticscholar.org/paper/Ash-from-the-Eyjafjallaj%C3%B6kull-eruption-(Iceland)%3A-Dellino-Gudmundsson/a55785e73c5d1ebaa1fcca0b42c6063491506ddf/figure/3) [15.09.2019]

DELTA FALCON (2010): Travel crisis in Europe 2010. Online verfügbar unter: URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Travel_crisis_in_Europe_2010.png

- DIAMOND, JACK (1986): Route of aircraft. Online verfügbar unter: URL: <https://skypointer.files.wordpress.com/2010/04/volcanic-ash1.pdf> [02.02.2020]
- EUROCONTROL (2010): Flights in Europe. In: *Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic* (S. 1)
- FRÍÐRIKSSON, Árni (2010): Eruption at Eyjafjallajökull April 17, 2010. Online verfügbar unter: URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/73/Eyjafjallajokull-April-17.JPG/1200px-Eyjafjallajokull-April-17.JPG>
- HUNT, Steve (2010): First Vent At night April1, 2010. Online verfügbar unter: URL: https://img.volcanodiscovery.com/fileadmin/photos/iceland/2010/jorge/picture_289-2.jpg
- ICELANDIC MET OFFICE (2010): Plume height by weather radar. Online verfügbar unter: URL: https://en.vedur.is/media/vedurstofan/myndasafn/medium/afm-vi_sigk2.jpg [15.09.2019]
- MET OFFICE (2010a, 14. April): VAG_140948. Online verfügbar unter: URL: https://www.metoffice.gov.uk/aviation/vaac/data/VAG_140948.png [29.09.2019]
- MET OFFICE (2010b, 16. April): VAG_161126. Online verfügbar unter: URL: https://www.metoffice.gov.uk/aviation/vaac/data/VAG_161126.png [29.09.2019]
- MET OFFICE (2010c, 18. April): VAG_1271591499. Online verfügbar unter: URL: https://www.metoffice.gov.uk/aviation/vaac/data/VAG_1271591499.png [29.09.2019]
- MET OFFICE (2010d, 20. April): Modelled Ash Concentration from FL000 to FL200 at 0000 UTC 20/04/2010. Online verfügbar unter: URL: <https://cdn.ima.org.uk/wp/wp-content/uploads/2016/01/Met-Office-Eyjafjallajokull-ash-tracking.png> [24.11.2019]

- MET OFFICE (2011, 24. Mai): Modelled Ash Concentration from FL000 to FL200 at 0600 UTC 24/05/2011. Online verfügbar unter: URL: https://www.researchgate.net/profile/Julie_Herrick2/publication/261706744/figure/fig1/AS:296631737044993@1447733925537/On-24-May-2011-the-London-Volcanic-Ash-Advisory-Centre-VAAC-released-this-map-of.png [24.11.2019]
- MÉTÉO-FRANCE (2011, 17. Juni): Modelled Ash Concentration from FL000 to FL200 17/06/2011 12h00 UTC. Online verfügbar unter: URL: <https://www.southafrica.to/transport/Airlines/SAA-flights/2011/ash-cloud-South-Africa.JPG> [24.11.2019]
- MOODY, Eric (1982): 4 Engine damage to one of the BA9 engines involved in an encounter with ash from Galunggung volcano on 24 June 1982. Online verfügbar unter: URL: https://www.researchgate.net/figure/Engine-damage-to-one-of-the-BA9-engines-involved-in-an-encounter-with-ash-from-Galunggung_fig2_317000563
- PESCHKE, Holger (2011): Ein Lichtblitz eines Elmsfeuers auf der Frontscheibe des Cockpit eines Airbus nahe Barcelona. Online verfügbar unter: URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elms_Feuer_aus_Cockpit.JPG
- PRATA, Fred, ROSE, Bill (2015): The three-zone system introduced by the UK Civil Aviation Authority in May 2010 in response to the Eyjafjallajökull ash crisis. Online verfügbar unter: URL: <https://ars-els-cdn-com.ezproxy.techlib.cz/content/image/3-s2.0-B9780123859389000523-f52-05-9780123859389.jpg> [24.11.2019]

8 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Anteil der annullierten Flüge: 5 ausgewählte Flughäfen (McLaren, 2019 aus Daten von EUROCONTROL, 2010)	39
Abbildung 1: Grundsätzlicher Aufbau eines Strahltriebwerks (Dahl, 2016)	8
Abbildung 2: Akkumulation vom Material auf den Leitschaufeln (Moody, 1982)	9
Abbildung 3: Sich auf die Luftfahrt oft auswirkende Vulkane 1953-2010 (McLaren, 2019)	11
Abbildung 4: Route von BA9, Galunggung eingezeichnet (Diamond, 1986)	12
Abbildung 5: Lichtblitz eines Elmsfeuers auf der Frontscheibe des Cockpits eines Airbus (Peschke, 2011)	13
Abbildung 6: Die effusive Eruption im Fimmvörðuháls (Hunt, 2010)	16
Abbildung 7: Aschen- und Dampfreiche Eruptionssäule am 17. April (Fridriksson, 2010)	17
Abbildung 8: Ascheteilchen unter einem REM (Dellino u.a., 2012)	19
Abbildung 9: Höhe der Eruptionssäule im Verlauf der Zeit (Icelandic Met Office, 2010)	20
Abbildung 10: Aschevorhersage vom 14. April 2010 12:00 UTC für die nächsten 24 Stunden (Met Office, 2010)	22
Abbildung 11: Aschevorhersage vom 16. April 2010 12:00 UTC für die nächsten 24 Stunden (Met Office, 2010)	23
Abbildung 12: Aschevorhersage vom 18. April 2010 12:00 UTC für die nächsten 24 Stunden (Met Office, 2010)	24
Abbildung 13: Mit den Sperren betroffene Staaten (DeltaFalcon, 2010)	25
Abbildung 14: Eine ergänzende Vorhersagekarte vom 20. April 2010 (Met Office, 2010)	30
Abbildung 15: Das revidierte Drei-Zonen-System der CAA (Prata & Rose, 2015) ...	31
Abbildung 16: Britische ergänzende Karte nach der Eruption des Grimsvótn 2011 (Met Office, 2011)	33
Abbildung 17: Französische ergänzende Karte nach der Eruption des Vulkankomplexes Puyehue-Cordón Caulle 2011 (Météo-France, 2011)	33

Abbildung 18: Anzahl der Flüge in Europa pro Tag, April 2010 (EUROCONTROL, 2010)	35
Abbildung 19: Anteil der annullierten Flüge: Europa (McLaren, 2019 aus Daten von EUROCONTROL, 2010)	36
Abbildung 20: Anteil der annullierten Flüge: am stärksten betroffene Länder (McLaren, 2019 aus Daten von EUROCONTROL, 2010)	37
Abbildung 21: Anteil der annullierten Flüge: CZ & AT (McLaren, 2019 aus Daten von EUROCONTROL, 2010)	38

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorwissenschaftliche Arbeit eigenständig angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Prag, am 14. Februar 2020

Unterschrift